SU CHIANG SHU FAYA

ESTUDO DO COMPORTAMENTO TÉRMICO E MECÂNICO DO ENVOLTÓRIO DE TÓRIO METÁLICO EM REATORES RÁPIDOS REFRIGERADOS POR GÁS

Orientador: Prof. Dr. Willem Jan Oosterkamp

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para a obtenção do Titulo de Mestre em Engenharia

São Paulo, 1975

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Rômulo Ribeiro Pieroni, Superintendente do Instituto de Energia Atômica, por tornar possível a realização deste trabalho.

Ao Prof. Eng. Pedro Bento de Camargo, Coordenador Geral da Coordenadoria de Engenharia Nuclear pelo apoio recebido.

Ao Prof. Dr. Roberto Y. Hukai, Assistente da Chefia da Coordenadoria de Engenharia Nuclear, pelas críticas , sugestões e constante incentivo.

Ao Prof. Dr. Willem Jan Oosterkamp, meu Orientador, por sua dedicação e orientação no desenvolvimento deste trabalho.

Aos operadores e analistas do Centro de Processamento de Dados pela execução dos programas.

À Srta. Creusa Moreira Diniz pelos trabalhos de datilografia.

Aos colegas da Coordenadoria de Engenharia Nuclear pelo apoio e constante interesse demonstrado.

RESUMO

Este estudo procurou analizar o comportamento térmico e mecânico de um envoltório metálico destinado aos reatores rápidos refrigerados por gás. Calculou-se o número de canais de refrigeração necessários e estudou-se a distribuição de temperaturas no elemento mais quente para que a temperatura máxima no envoltório não atingisse a temperatura de transição de fase do tório metálico. Com a distribuição da temperatura obtida, calculou-se a distribuição de tensões térmicas. O tório metálico mostrou-se viável sob os aspectos estudados. Comparativamente, ao $UO_2(ThO_2)$ o tório metálico proporcionou vantagens , principalmente por possuir alto coeficiente de condutibilidade térmica, possibilitando o uso dos elementos em forma de blocos invés de pastilhas cerâmicas como no caso dos óxidos.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO 1

2. PROPRIEDADES DE TÓRIO METÁLICO 6

3. DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURAS 9

3.1 - Introdução.. 9

3.2 - Método de cálculo................................ 15

4. DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES TÉRMICAS 24

4.1 - Introdução.. 24

4.2 - Método de cálculo................................ 25

5. RESULTADOS 26

5.1 - Introdução.. 26

5.2 - Distribuição de temperaturas.................... 26

5.3 - Distribuição de tensões térmicas............... 31

6. CONCLUSÕES 37

APÊNDICE A - Cálculo da queda de temperatura dentro do canal de refrigeração no sentido radial da equação de Helmholtz......................... 39

APÊNDICE B - Equações usadas no cálculo de tensões térmicas pelo método de relaxação dinâmica 42

APÊNDICE C - Listagem do programa PV1 66

APÊNDICE D - Referências Bibliográficas 79

1. INTRODUÇÃO

O crescente consumo mundial de energia acarretou um aumento de interesse em utilizar a energia nuclear como uma das maneiras de satisfazer tal demanda. A produção de combustível nuclear, consequentemente, tornou-se um problema importante.

Em reatores de potência há possibilidade de se converter material fértil em material físsil. Em reatores rápidos a quantidade de material físsil produzida pode ser maior que a consumida. Isto é conseguido envolvendo-se o caroço com uma camada de material predominantemente fértil chamado envoltório (blanket) que, ao mesmo tempo, funciona como blindagem de neutrons. Assim, apesar dos reatores de potência atualmente em funcionamento serem em sua maior parte do tipo térmico, acredita-se que futuramente os reatores rápidos serão largamente empregados.

Os dois principais modos de gerar nuclídeos físseis através de nuclídeos férteis são os seguintes:

1) $\text{U-238 } (n,\gamma) \text{ U-239} \xrightarrow[23.5\text{ min}]{\beta^-} \text{N}_p\text{-239} \xrightarrow[2.35\text{ dias}]{\beta^-} \text{Pu-239}$

2) $\text{Th-232}(n,\gamma)\text{Th-233} \xrightarrow[21.1\text{ min}]{\beta^-} \text{Pa-233} \xrightarrow[27.4\text{ dias}]{\beta^-} \text{U-233}$

Há vantagens econômicas em se produzir U-233 nos reatores rápidos em vez de Pu-239, dada às excelentes propriedades neutrônicas de U-233 num espectro térmico. Estudos recentes /28/ indicam que U-233 terá um valor 50% a 100% maior do que o Pu-239, pelo menos até o fim deste século.

Num reator térmico, o U-233 é combustível mais eficiente do que U-235 ou Pu-239 , pois o valor do parâmetro η (número médio de neutrons produzidos por neutron absorvido) daquele nuclídeo é maior que o dos outros.

Além disso, a utilização de tório é, a priori, uma das maneiras de se economizar urânio. O mercado nos próximos anos será dominado por reatores térmicos e o U-233 poderia substituir o U-235 para enriquecer urânio natural, com grandes vantagens. Por exemplo, taxas de conversão maiores seriam obtidas em virtude do maior valor de eta do U-233.

A Tabela abaixo indica as estimativas de reservas mundiais de urânio feitas em 1973 /15/.

Tabela 1.1 - Reservas mundiais de U_3O_8 em 1973

	U$ 10/lb	U$10-15/lb
Reservas razoavelmente asseguradas, ton curtas	1 127 000	868 000
Reservas adicionais estimadas, ton curtas	1 177 000	886 000

Considerando-se apenas reatores térmicos em funcionamento, de acordo com as estimativas feitas de demanda mundial de urânio baseadas na curva de crescimento da capacidade de instalações nucleares , as reservas de urânio com custo abaixo de U$10/lb (dólares 1973) esgotarão em 1994. Para satistazer a demanda do ano 2000 com urânio abaixo de U$ 10/lb de U_3O_8, seriam necessários a descoberta, em média, de 70.000 toneladas por ano de U_3O_8 a partir de 1973, o que não é uma tarefa fácil de se realizar.

Por outro lado, há uma reserva apreciavel de tório no mundo. As reservas mundiais em 1972 /14/, em monazita e de minérios, na forma de ThO_2, eram cerca de 365.000 toneladas asseguradas e 1.030.000 toneladas inferidas.

De acordo com a ref. /15/, em fins de 1972, estimava-se em 2400 toneladas as reservas brasileiras de tório com teor médio de 5% de ThO_2 e custo inferior a U$ 10/libra de ThO_2. Entretanto, as fontes potenciais de tório são consideráveis. Cerca de 30.000 toneladas de ThO_2 medidas e 1.200.000 estimadas com teor de 0,09% estão associadas ao pirocloro de Araxá, MG. Estas fontes podem-se tornar econômicamente viáveis à medida que o preço do nióbio se eleve no mercado internacional pois aquele metal também acha-se presente em grandes quantidades no minério. Uma fonte mais promissora é a do Morro de Ferro em Poços de Caldas com cerca de 35.000 toneladas medidas e um teor de 1 a 2%.

A introdução de reatores rápidos e a utilização de tório nos seus envoltórios poderão produzir uma quantidade substan cial de U-233, pois aproximadamente 30% de produção de material físsil toma lugar no envoltório.

Poucas pesquisas foram feitas sobre o comportamento do envoltório porque esta região é muito menos crítica do que o caroço para o funcionamento do reator.

Em 1973 , P.J. Wood e M. J. Driscoll /27/ apresentaram um estudo realizado no MIT sobre envoltório de óxido de tório em reatores rápidos refrigerados por metal líquido (LMFBR). Sob o ponto de vista de geração de calor o envoltório de ThO_2 apresentou comportamento similar ao de UO_2.

Baseado em estudos recentes realizados na General Atomic, esta companhia propos o uso de envoltório de óxido de tório em reatores rápidos refrigerados a gás (GCFR) / 6/.

O óxido de tório tem comportamento semelhante ao de óxido de urânio, mas não aproveita as excelentes propriedades físicas de tório metálico. Entre estas pode-se destacar o alto coeficiente de condutividade térmica (460 J/mseg^{o}C). Esta propriedade possibilita o uso potencial de combustíveis na forma de blocos metálicos com canais de refrigeração enquanto combustíveis óxidos são colocados dentro de tubos de aço inoxidável (cladding). Pode-se assim diminuir os custos de fabricação do envoltório.

O presente trabalho é um complemento de uma avaliação neutrônica * de envoltórios de tório metálico em reatores GCFR. Consiste num estudo do comportamento térmico e mecânico de elementos combustíveis de tório metálico. De importância especial são a distribuição de temperaturas e tensões térmicas no tório metálico.

---

* Faya, A. J. " Avaliação Neutronica de "Blankets" de Tório Metálico em Reatores Rápidos Refrigerados por Gás", Tese de Mestrado a ser publicada.(EPUSP)

2. PROPRIEDADES DE TÓRIO METÁLICO

Nas últimas décadas dado o crescente interesse de uso de tório em reatores nucleares, realizaram-se experiências e pesquisas que forneceram uma quantidade substancial de informações em relação às propriedades físicas, mecânicas e químicas de tório e algumas de suas ligas como tório-urânio.

Tório é um metal bem comportado, semi-refratário. A maior parte de suas características é típica de metais cúbicos de face centrada. Em uma temperatura de aproximadamente 1400°C sofre uma transformação alotrópica, quando a sua estrutura cristalina passa a ser cúbica de corpo centrado. Possui um alto ponto de fusão. Sua condutividade térmica é aproximadamente o dobro daquela do aço inoxidável.

Algumas de suas propriedades físicas e mecânicas são relacionadas abaixo:

densidade, kg/m^3..................................... $1{,}172 \times 10^4$
ponto de fusão, °C..................................... 1690 - 1750
módulo de elasticidade, N/m^2 (25°C)............... $7{,}24 \times 10^{10}$
coeficiente de Poisson (25°C)....................... 0.27
condutividade térmica, J/seg m°C(100-650°C)........ 41,9
coeficiente de expansão linear, $°C^{-1}$(25-1000°C).... $12{,}5 \times 10^{-6}$

Suas propriedades físicas e mecânicas são fortemente influenciadas pelo nível das impurezas e pelo conteúdo no caso de ligas. Poucos tipos de ligas de tório foram estudados. Os três mais importantes são: Th-U, Th-Pu e Th-C.

O comportamento de tório submetido a irradiações de neutrons tem sido estudado experimentalmente. Numa pesquisa realizada no Battelle Northwest Laboratory /12/, os elementos de amostra tubulares de tório contendo 2.5% de urânio e 1% de zircônio em pêso, foram irradiados em água a 260ºC, 117 x 10^5 a 146 x 10^5 N/m^2 , com alto fluxo de calor (15,77 a 3,15 x $10^6 J/m^2 seg$) e alta potência específica (35 a 70 watts/g de combustível) durante 5 anos. Os elementos de amostra sofreram um alongamento ("swelling") mínimo teórico de apenas 2% para queimas de 10.000 MWd/T. Mesmo após uma exposição máxima de 21.000 MWd/T não houve indicação de aproximar-se de um limite.

Estudos experimentais com amostras pequenas de tório e ligas de tório mostraram que o tório possui excelente estabilidade dimensional durante a irradiação correspondente a uma queima de 5 at%, no intervalo de temperatura de 90 a 770^{o}C. O aumento de volume foi 1-2% por at% de queima que representa um mínimo de alongamento teórico previsto. Este aumento é dado à acumulação de átomos de produtos de fissão no retículo de tório. Não se sabe se para um nível maior de queima resultaria um aumento na taxa de alongamento. Em ligas contendo mais de 25% em pêso de urânio ocorre enrugamento na superfície e distorção da amostra. Quando se aumenta o conteúdo de urâ -

nio o efeito torna-se mais acentuado. Acima de 650°C a taxa de alongamento de tório aumenta para aproximadamente 6% por at% de queima em 800°C. Acima de 800°C os dados são conflitantes.

A excelente resistência de tório à radiação e ao alongamento resulta da sua estrutura cristalina isotrópica. As limitações de queima e temperatura para tório e suas ligas ainda não foram bem estabelecidas. Embora as informações existentes na literatura com respeito às propriedades do tório sob irradiação sejam suficientes para uma estimativa razoável com vistas ao uso do material, mais experiências fazem-se necessárias para cálculos mais refinados.

3. CÁLCULO DA DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURAS E NÚMERO DE CANAIS DE REFRIGERAÇÃO

3.1 - Introdução

Este Capítulo trata do estudo térmico de um elemento de combustível de tório metálico proposto para utilização no envoltório (blanket) do reator GCFR de demonstração comercial de 300 MWe.

Este reator vem sendo desenvolvido pela companhia General Atomic, com sede nos Estados Unidos, há aproximadamente doze anos. Ele utiliza a tecnologia do elemento de combustível do LMFBR (Liquid Metal Fast Breeder Reactor) e, como refrigerante, o hélio , cuja tecnologia já está bem desenvolvida em reatores de alta temperatura, como o HTGR (High Temperature Gas-Cooled Reactor), fabricado pela mesma companhia.

Uma das grandes vantagens do GCFR sobre o LMFBR é que o hélio interage pouco com neutrons, possibilitando assim maior taxa de captura por parte do caroço e do envoltório, resultando numa maior produção de material físsil.

Dado as reservas limitadas de material físsil , e as características do GCFR, acredita-se que no futuro este reator será largamente empregado na produção de energia.

Em julho de 1974, a General Atomic apresentou o segundo relatório sobre o projeto do reator GCFR de demonstração . Para o envoltório radial cogitava-se a utilização de tres fileiras de elementos combustíveis de ThO_2 ou duas fileiras de UO_2.

O tório metálico, Th-232, dotado de um alto coeficiente de condutividade térmica poderia ser fabricado em blocos com canais de refrigeração dispostos convenientemente ao invés de pastilhas cerâmicas como no caso de óxidos. assim, com a utilização desses blocos no envoltório radial do GCFR, a fração volumétrica de material fértil torna-se maior, podendo-se usar apenas uma fileira de elementos*.

O tório metálico, ao capturar neutrons que escapam do caroço do reator, transforma-se em material físsil , U-233 por sucessivos decaimentos beta.

O U-233 ao ser fissionado por neutrons proporciona, em média , uma quantidade recuperável de energia de 193 MeV por fissão. (A energia proveniente da emissão gama e espalhamento inelástico de neutrons é pequena comparada aquela gerada na fissão sendo desprezada neste trabalho). Esta geração de calor produz uma certa distribuição de temperatura na região fértil. Canais de refrigeração são necessários para que a temperatura não aumente continuamente. O tório metálico possui uma transformação alotrópica perto de 1400^{o}C que causa mu

* Idem , página 5

danças em suas propriedades físicas. Portanto, a temperatura máxima na região fértil não deve atingir 1400°C.

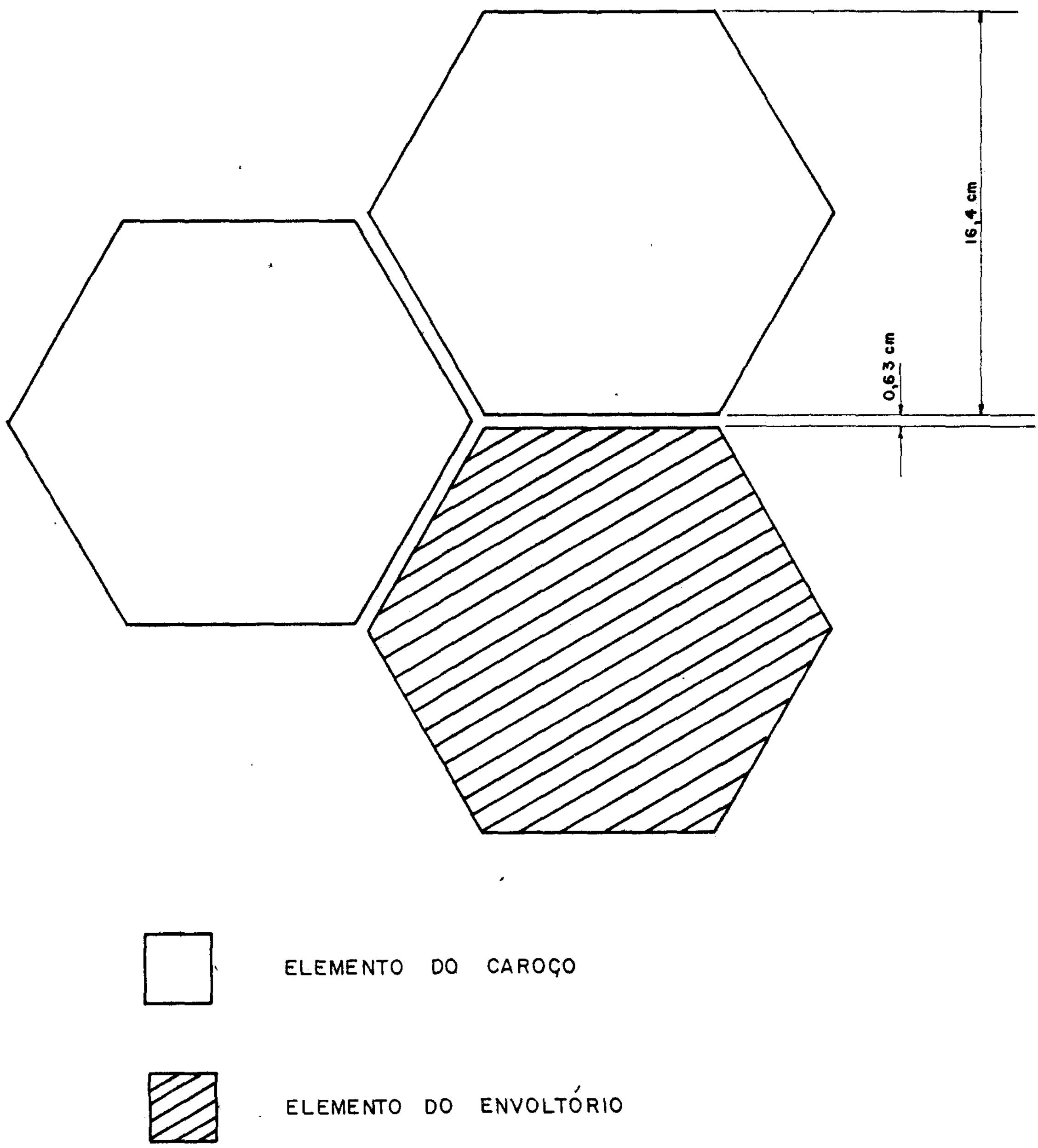
Precisa-se verificar qual a parte do envoltório que está sujeita às maiores temperaturas. Em reatores, de um modo geral, os elementos combustíveis possuem maior densidade de potência em torno de sua altura média devido a maior fuga de neutrons pelas extremidades. Assim, a parte central de um elemento do envoltório é atingida por maior número de neutrons e, consequentemente, mais fissões ali ocorrem resultando numa maior geração local de calor. Além disso, quanto menor for a distância ao caroço, maior será a taxa de fissão, devido ao maior fluxo de neutrons.

Calcula-se, então, o número mínimo de canais de refrigeração necessários e a sua distribuição num elemento do envoltório de modo que a temperatura máxima numa secção na altura média do elemento não atinja 1400°C.

Os elementos do envoltório do GCFR apresentam uma secção hexagonal com 350 cm de comprimento. A distância entre dois lados opostos do hexágono é de 16.4 cm. Foram adotadas as mesmas dimensões para o bloco de tório metálico considerado .

A Fig. 3.1 mostra uma secção de um elemento combustível típico do envoltório.

Para efeito de cálculo, dada a simetria geométrica , usa-se apenas a metade do hexágono. A distribuição de


16,4 cm
0,63 cm
ELEMENTO DO CAROÇO
ELEMENTO DO ENVOLTÓRIO

temperatura na segunda metade é simétrica à primeira.

A Fig. 3.2 mostra a parte da secção do elemento combustível que será estudada. Como ilustração alguns canais de refrigeração com 1 cm de diametro são apresentados.

Pode-se mostrar grosseiramente que este valor de diâmetro estimado é aceitável. Em média* um elemento de caroço - gera energia com uma potência de 6 a 7 MW. Um elemento novo na região central do caroço pode produzir até 10 MW. A área transversal reservada para o refrigerante no caroço é aproximadamente de 50% da área total, o que corresponde a cêrca de 100 cm^2 de área de refrigeração por MW gerado. Por outro lado, um elemento - de envoltório mais "quente", isto é, um elemento que permaneceu - por mais de 2 anos em funcionamento no reator, gera energia com uma potência de aproximadamente 1 MW. Precisa-se, portanto, de 10 cm^2 de área de refrigeração por elemento. Desprezando-se a refrigeração lateral, a área de refrigeração é igual à área de um canal multiplicado pelo número de canais (quatro, como será justificado posteriormente).

Donde, $4 \pi r^2 = 10 \text{ cm}^2$

$r = 0,9 \text{ cm}$.

---

* Idem , pagina 5

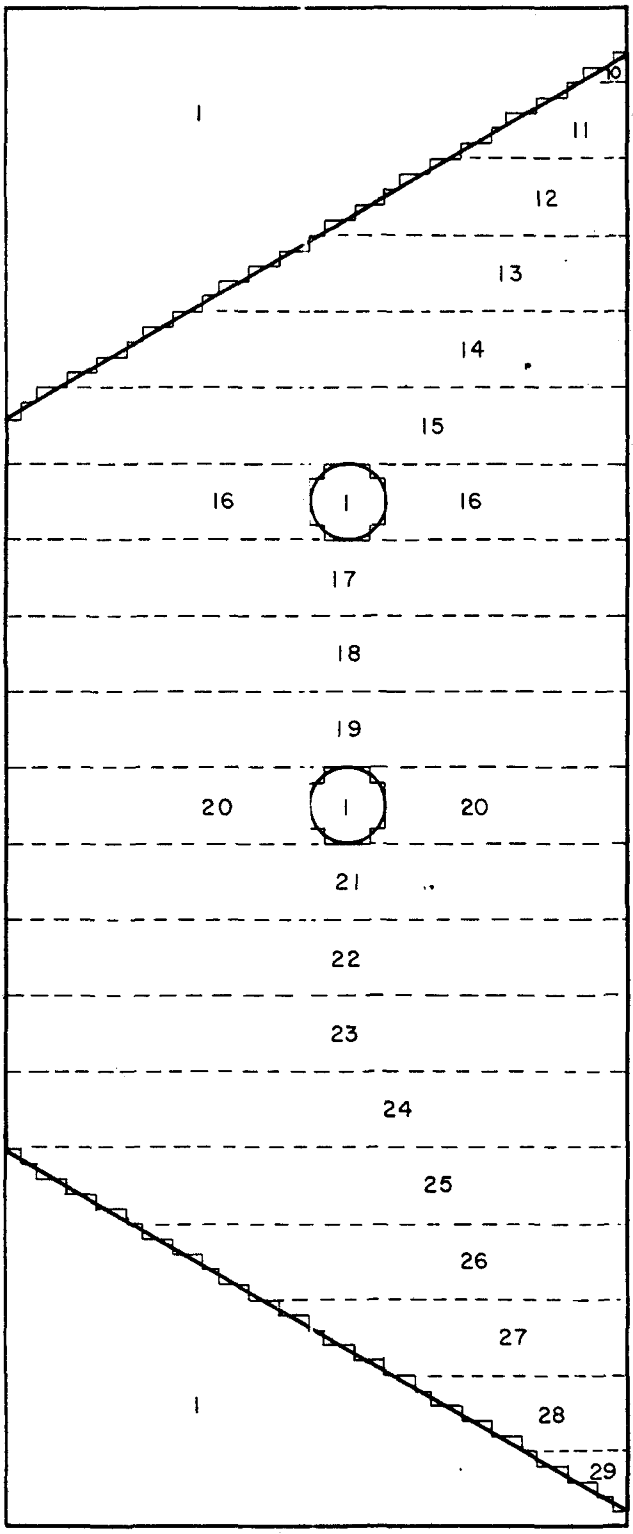


Fig. 3-2 - Aproximação usada para simular a secção horizontal do elemento de Th

Pode-se notar que o raio calculado é superestimado por ter-se desprezado a refrigeração no contorno do elemento. Sabe-se também que a queda de pressão do helio, nos canais, aumenta com o diâmetro e, consequentemente, o trabalho de bombeamento, deve ser minimizado no projeto. Além disso um diâmetro pouco diferente daquele utilizado teria influência desprezível na distribuição de temperaturas que sofreriam pequenas modificações somente próximo aos canais de refrigeração.

3.2 - Método do Cálculo

O número de canais de refrigeração e sua distribuição foram obtidos por tentativas. Obteve-se primeiramente a distribuição de temperaturas na secção central de um elemento do envoltório sem canais de refrigeração. Repetiu-se o cálculo colocando-se canais de refrigeração nos locais onde as temperaturas ultrapassem de 1400^{o}C. Variando-se o número de canais e sua distribuição no elemento, obteve-se o número mínimo de canais tal que a temperatura máxima no envoltório não atinja 1400^{o}C.

O cálculo de temperaturas foi executado utilizando-se o programa de difusão CITATION /6/. O programa CITATION foi desenvolvido pelo laboratório de Oak Ridge para executar cálculos que se baseiam na representação por diferenças finitas da teoria de difusão de neutrons.

Neste estudo o programa CITATION foi usado para calcular temperaturas, pois a equação que rege a condução do calor é, matemàticamente, a mesma equação que rege a difusão de nêutrons.

A equação de difusão de nêutrons monoenergéticos no estado estacionário é dada por /11/:

$$D\nabla^2\phi + (\nu\,\Sigma_f - \Sigma_a)\,\phi + S = 0 \qquad (3.1)$$

onde : D = coeficiente de difusão de nêutrons (m)

ν - número médio de nêutrons produzidos, por fissão

Σ_f= secção de choque de fissão macroscópica (m^{-1})

Σ_a= secção de choque de absorção macroscópica (m^{-1})

S = fonte de nêutrons (n/m^3seg) .

A equação de condução de calor no estado estacionário é dada pela equação de Poisson /4/:

$$\nabla^2 t + \frac{q'''}{k} = 0 \qquad (3.2)$$

Uma outra equação de interesse é a equação de Helmholtz /3/:

$$\nabla^2 t + B^2 t = 0 \qquad (3.3)$$

onde B^2 é uma constante.

Das equações (3.2) e (3.3) pode escrever:

$$k\nabla^2 t - bt + q''' = 0 \qquad (3.4)$$

onde k = coeficiente de condutividade térmica (J/m^oCseg)

q'''= fonte de calor (J/m^3seg)

t = temperatura (^oC)

b = coeficiente de absorção de calor (J/m^3seg^oC)

O termo b, coeficiente de absorção de calor, é usado para caracterizar os meios absorvedores de calor, como o caso de um fluido refrigerante.

Conforme mostra a Fig. 3.2 , o retângulo usado para simular o elemento foi dividido em 21 regiões. A região 1 pertence ãs secções por onde passa o fluido refrigerante, isto é, os canais de refrigeração e os interstícios entre 2 elementos consecutivos. As regiões 10 a 29 pertencem ao envoltório. A Fig. 3.2 mostra também como o hexágano e os canais de refrigeração foram aproximados.

Para o envoltório, onde não há absorção de calor, o valor de b é zero.

Neste caso , a equação de condução de calor é dada pela equação de Poisson:

$$k_a \nabla^2 t + q''' = 0 \qquad (3.5)$$

onde k_a é conductividade térmica de tório, material constituente do envoltório. A Eq. 3.5 possui 2 constantes, k_a e q''' . O tório metálico possui um coeficiente de condutividade térmica k_a igual a 40 watts/m^{o}C. O valor de q''' foi considerado constante para cada região do envoltório, conforme mostra a Tabela 3.1. Esta Tabela foi obtida pela curva de distribuição de potência dado ao calor produzido por fissão de U-233 no elemento mais quente do envoltório metálico em função da distância do ponto do envoltório ao caroço do reator GCFR de 300 MWe. A distribuição de potência foi calculada por Faya*.

Tabela 3.1 - Densidade de potência no elemento mais quente do envoltório

Região	q''' (watts/cm^3)
10	61
11	55
12	50
13	46
14	42
15	38
16	35
17	32
18	29
19	27
20	25
21	23
22	21
23	19
24	18
25	17
26	16,5
27	16
28	15,5
29	15

* Idem, página 5

O refrigerante é simulado por um absorvedor de calor (b $\neq$ 0) onde não há fontes de calor. Aplica-se portanto, a equação de Helmholtz.

$$k \nabla^2 t - bt = 0 \qquad (3.6)$$

As contantes k e b da Eq. 3.6 são dependentes das condições de contorno do problema.

Foram impostas as seguintes condições de contorno: do lado direito do retângulo, temperatura refletida, ($\frac{\partial T}{\partial x} = 0$) e, para os lados restantes, temperatura zero.

Impõe-se também que a temperatura seja zero nos contornos por onde passa o refrigerante, isto é, nos três lados do meio hexágono e nos contornos dos canais de refrigeração nele contidos.

Calcula-se , portanto, a distribuição de temperaturas em relação a referência zero. Somando a temperatura dos contornos às temperaturas obtidas no retângulo, obtem-se a distribuição de temperaturas reais no envoltório.

A condição de contorno imposta é satisfeita pela Eq. 3.6 , atribuindo valores relativamente grandes para as constantes k e b. Com os valores k = 2000 watts/m^{o}C e b = 2x10^8 watts/m^3 ^{o}C , as temperaturas obtidas nos contornos por onde passa o fluido refrigerante são próximas de zero.

Demonstra-se (Apêndice A) que a solução da Eq.3.6 apresenta variações pequenas de temperatura, mesmo quando o fluxo de calor no contorno seja grande. Assim, considerando-se zero a temperatura no centro dos canais de refrigeração, a temperatura no contorno dos canais é próximo de zero, compatível com a condição de contorno imposta.

Examina-se agora a temperatura do contorno tc .

O calor se transfere da parede para o fluido ocasionando o aparecimento de um gradiente de temperatura. Este gradiente é acentuado numa camada nas proximidades da parede, como mostra a Fig. 3.3 , ou seja na "camada limite".

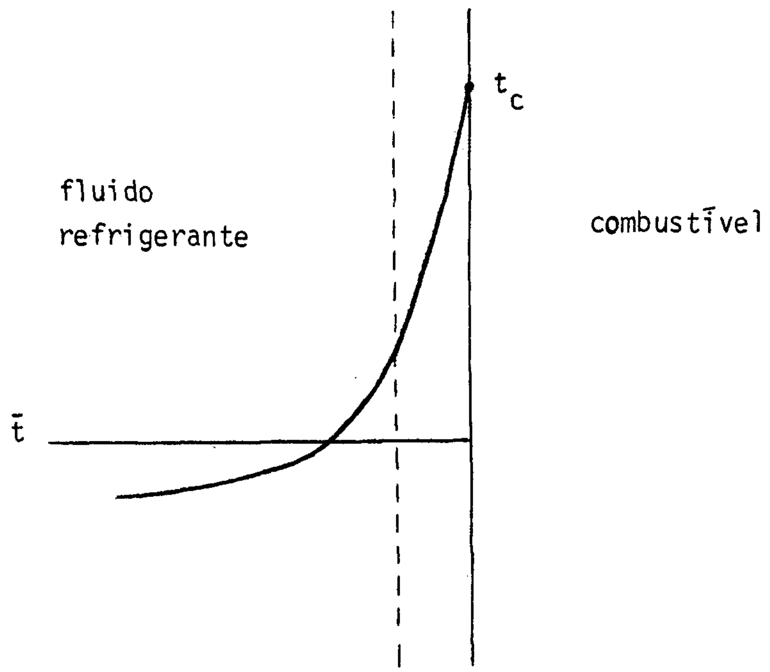


Fig. 3.3 - Gradiente de temperatura na convecção forçada

A temperatura t_c pode ser obtida pela seguinte equação /4,17/

$$q''' = h(t_c - t) \qquad (3.7)$$

onde t = temperatura fo fluido na secção central do canal, ^oC.

q_c''' = fluxo de calor no contorno da parede do canal, $watt/m^2$

h = coeficiente de película, $watt/m^{2\,o}C$.

No caso de refrigeração de reatores nucleares, onde é aplicada a convecção forçada, o refrigerante está sob condições de escoamento turbulento. Os resultados de vários estudos experimentais de transferência de calor para um fluido refrigerante num longo canal cilíndrico indicam que a seguinte correlação para o número de Nusselt /8/ é apropriada para o caso em estudo:

$$N_u = \frac{hD}{k} = 0{,}023 \left(\frac{\rho DV}{\mu}\right)^{0,8} \left(\frac{C_p \mu}{k}\right)^{0,4} \qquad (3.8)$$

onde as propriedades físicas de hélio gasoso são dadas em condições de operação do reator GCFR de 300 MWe / 7 / .

D (diâmetro do canal) = 0,01 m

C_p(calor específico em pressão constante) = 5200 J/kg^oC

k (condutividade térmica do hélio gasoso) = 0,2953 watts/ m^oC

μ (viscosidade do hélio gasoso) = $2{,}31 \times 10^{-5}$ kg/m seg

ρ (densidade do hélio gasoso) = 6 kg/m^3

O valor de V, velocidade de fluido refrigerante no canal, é obtido usando-se a seguinte relação:

$$\int_0^H q_c''' \; A_{hex} dH = V.\rho \; .A_{ref} \; C_p(t_s - t_e \;) \qquad (3.9\;)$$

donde

$$V = \frac{A_{hex} \int_0^H q''' dH}{\rho \; A_{ref} \; C_p(t_s - t_e)}$$

q''' (densidade de potência no elemento combustível mais quente)

H (altura do canal) = 3,5 m

R (raio do canal) = 0,005 m

t_s (temperatura de saída do refrigerante) = 550°C

t_e (temperatura de entrada do refrigerante) = 322,7°C

A_{hex}(área do elemento combustível hexagonal) = 0,0222m^2

A_{ref}(área do refrigerante) = 0,0021 m^2

A integral do numerador foi calculada numéricamente e obteve-se o seguinte resultado:

$$\int_0^{H/2} q_c''' \; dH \simeq \sum_{i=1}^{H} q_{ci}''' \; \Delta H_i = 59 MW/m^2 * \;, \quad i = 1,2...,10$$

---

* Idem,página 5

onde i representa cada região onde q_c''' é constante.

Portanto, $V = 76$ m/seg.

Da Eq. 3.8 tem-se: $h = 8.2$ KW/m^2 ^oC .

Aplicando-se novamente a Eq.3.9 e integrando-se até a meia altura do canal , obtem-se a temperatura do refrigerante t na secção central do canal. O resultado foi de $t = 436^oC$.

Substituindo-se os valores obtidos na Eq.3.7 obtem-se :

$$\Delta t = t_c - t = 140^oC. \text{ Donde } t_c = 576^oC .$$

Por considerações de segurança utilizou-se $t_c = 700^oC$.

4. TENSÕES TÉRMICAS

4.1 - Introdução

A distribuição de temperatura no elemento do envoltório de tório metálico obtida no Capítulo anterior provoca o aparecimento de tensões térmicas. Um estudo da distribuição destas tensões faz-se necessário. Se a tensão máxima presente no elemento for superior a tensão de limite de proporcionalidade do tório metálico, é necessário diminuir o gradiente de temperatura na região de maiores tensões. Isto é conseguido alterando-se o número e a distribuição dos canais de refrigeração. Um eventual aumento do custo de fabricação deve ser considerado.

Apresenta-se neste Capítulo o cálculo da distribuição de tensões térmicas num elemento do envoltório de tório metálico utilizando a distribuição de temperaturas obtida no Capítulo anterior com quatro canais de refrigeração no elemento.

Dos resultados obtidos no Capítulo anterior nota-se que a secção do elemento onde ocorre a temperatura máxima apresenta os maiores gradientes de temperatura. Por outro lado, a variação da temperatura na direção axial do elemento do envoltório, que aproxima-se de uma cossenóide , é pequena comparada com a variação na direção radial. Portanto, estudou-se a distribuição de tensões planas numa camada de espessura unitária na altura média do elemento fértil.

4.2 - Método de cálculo

Usou-se o método de relaxação dinâmica que estuda o comportamento dinâmico da estrutura /3,10,19/. Para efeitos de cálculos a estrutura em consideração, de espessura unitária, foi dividida em malhas retangulares idênticas as do Capítulo anterior / Fig. 3.3).

O Método da Relaxação Dinâmica calcula as tensões elasticas da seguinte forma: inicialmente, a velocidade de expansão de cada bloco resultante das tensões térmicas iniciais é convertida em deslocamento após um pequeno intervalo de tempo. Na etapa seguinte, calcula-se então a tensão resultante do deslocamento anterior. Usa-se esta tensão para calcular as velocidades após um segundo intervalo de tempo e o cálculo prossegue num processo iterativo. O amortecimento viscoso crítico é usado a fim de que se atinja a convergência, obtendo-se os valores de deslocamentos e tensões de cada bloco no estado estacionário. Além disso, é necessário que o número de iterações corresponda, no mínimo, a um tempo igual a um período da oscilação fundamental do sistema. Quando as velocidades dos blocos tendem a zero, a convergência está perfeita.

Utilizou-se o programa PV1 /3/ escrito com o objetivo de calcular tensões de carga em vasos de pressão. Algumas modificações tornaram-se necessárias para adaptar o programa para o cálculo de tensões térmicas (Apêndice C).

5. RESULTADOS

5.1 - Introdução

Neste Capítulo apresentam-se e discutem-se os resultados sobre a distribuição de temperaturas e distribuição de tensões térmicas no modelo em estudo.

Inicialmente, mostra-se a distribuição de temperaturas na secção central de um elemento mais quente do envoltório, sem canais de refrigeração , a fim de se destacar as regiões das secções que apresentam as maiores temperaturas para posterior posicionamento dos canais de refrigeração. Com o propósito de ilustração , mostra-se também a distribuição de temperaturas no elemento com 2 canais de canais de refrigeração. Em seguida, apresenta-se o resultado final obtido, isto é, a distribuição de temperaturas com um número de canais de refrigeração necessários ,de acordo com as hipóteses formuladas no Capítulo 3.

Para este último caso calcula-se a distribuição de tensões térmicas através do método de cálculo descrito no Capítulo 4.

5.2 - Distribuição de temperaturas

Inicialmente, calculou-se a distribuição de temperaturas na secção central do elemento de Th sem qualquer canal de refrigeração. Como a densidade de potência decresce em função da distância do caroço, as temperaturas mais altas situam-se próximas a interface caroço-envoltório como pode-se notar na Fig.5.1 que apresenta as linhas isotérmicas deste caso. Os gradientes de temperatura estão na região superior da secção - distâncias menores entre isotermas. Nos contornos, as temperaturas são baixas em virtude do contato metal-fluido refrigerante.

Seguindo-se o esquema traçado no Capítulo 3, posiciona-se dois canais de refrigeração, baseando-se na Fig.5.1, com o objetivo de impedir que as temperaturas superem o limite imposto(1400°C) . Nota-se pela Fig. 5.2 que este objetivo não é conseguido na faixa central da secção o que exige o acréscimo de novos canais.

Com quatro canais de refrigeração obteve-se o resultado desejado com temperatura máxima da ordem de 1100°C. O posicionamento dos canais e as linhas isotérmicas são mostrados na Fig. 5.3 . Nota-se que próximo aos contornos do elemento e aos canais de refrigeração, os gradientes de temperatura são maiores que em outras regiões. Isto deve acarretar o aparecimento de maiores tensões térmicas naqueles locais.

O uso de quatro canais de refrigeração se deve às considerações de segurança, pois, mesmo com três canais obter-se-ia uma temperatura máxima menor que 1400°C. Contudo, as maiores temperaturas na secção estariam perigosamente perto deste limite.

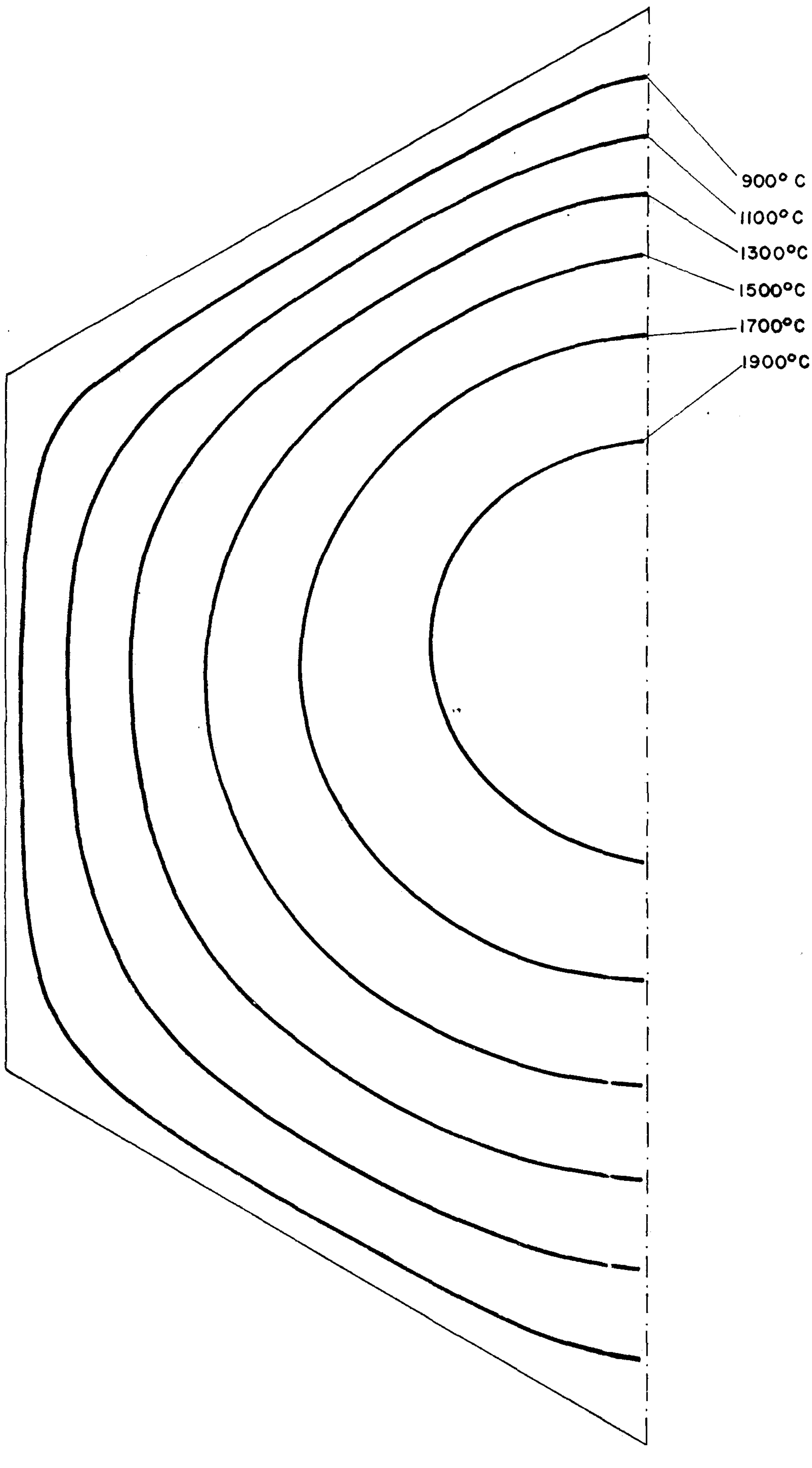


Fig. 5.1 - Linhas isotérmicas na secção central do elemento de Th sem canais de refrigeração

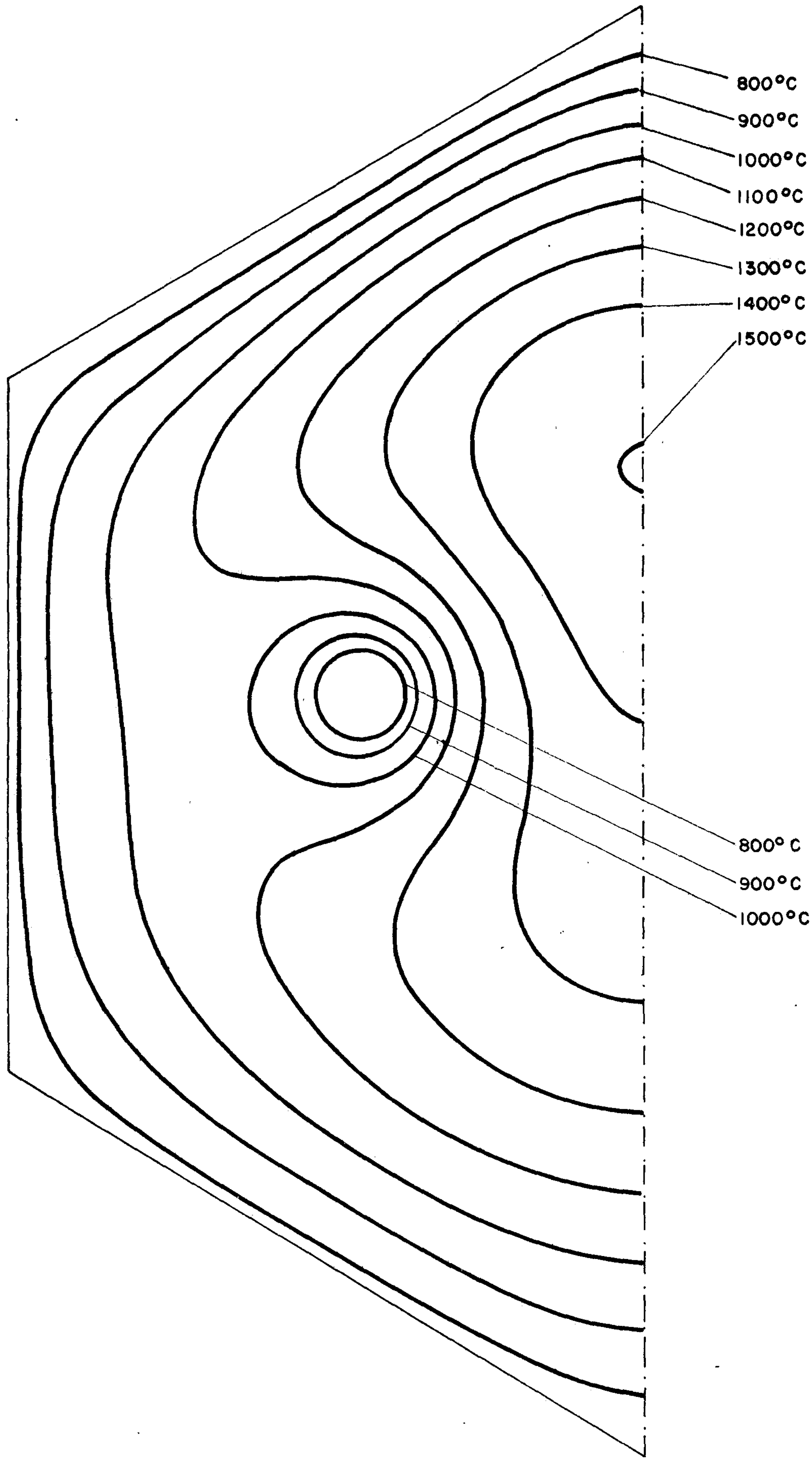


Fig. 5.2 - Linhas isotérmicas na secção central

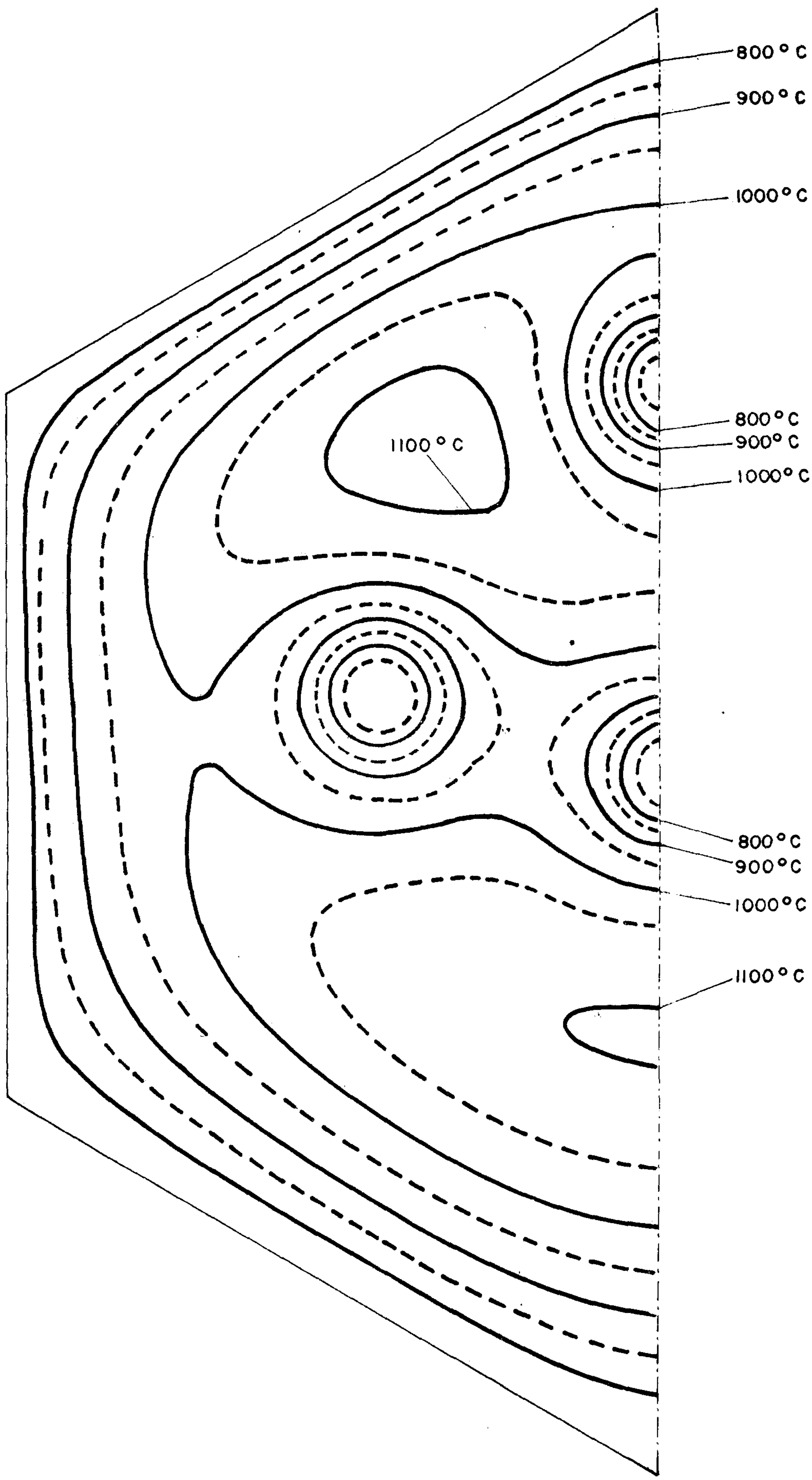


Fig. 5.3 - Linhas isotérmicas na secção central

5.3 - Distribuição de Tensões térmicas

Para se estudar a possibilidade de ruptura do material através da análise dos resultados obtidos da distribuição de tensões térmicas, usou-se a teoria de máxima tensão de cisalhamento (também denominada de Saint-Venant ou de Tresca) que é o mais seguro critério de resistência /2/. Esta teoria impõe a seguinte condição de resistência: "a maior tensão de cisalhamento T_{max} não deve ultrapassar a metade da tensão de limite de tração σ_T obtida no ensaio de tração simples". Assim, pelo círculo de Mohr, pode-se escrever:

$$T_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \leq \frac{\sigma_T}{2}$$

onde, σ_1 = tensão principal máxima

σ_2 = tensão principal mínima

Esta teoria, como se vê, só se aplica aos casos em que as resistências à tração são iguais, e a compressão aproxima-se muito dos casos reais relativos a materiais dúcteis. - Sendo o material em estudo um metal, esta teoria pode ser aplicada.

A tensão de limite de proporcionalidade de tório metálico /26/ é práticamente constante em temperaturas acima de 700^oC (cerca de 14×10^7 N/m^2). Observa-se que as tensões principais mínimas e máximas mostradas nas Figs. 5.4 e 5.5, respectivamente , não ultrapassam de 8×10^7 N/m^2, e ao mesmo tempo, o maior valor da máxima tensão de cisalhamento (Ver Fig. 5.6) é 5.026×10^7 N/m^2, que é inferior a metade da tensão de limite de proporcionalidade . Portanto, não é necessário o estudo de novo - posicionamento ou acréscimo de canais de refrigeração a fim de se diminuir os gradientes de temperatura, e portanto das tensões.

Nota-se que nas regiões próximas aos contornos de refrigeração, onde se encontram os maiores gradientes de tempe raturas, as tensões são maiores. Algumas tensões nos contornos ime diatamente em contato com o refrigerante se mostram pequenas dadas a expansão livre dos blocos nesses contornos.

Deve-se observar que neste estudo as temperaturas estão no estado de equilíbrio. Nas fases de operação e desligamento normal (ou de emergência) do reator, as temperaturas nos elementos combustíveis apresentam um comportamento transitório que pode provocar o aparecimento de valores altos de tensões térmicas. Para contornar este problema o GCFR usa sistemas de refrigeração - auxiliares que impedem variações bruscas de temperatura . Estudos posteriores poderiam verificar o comportamento da distribuição de tensões térmicas nas fases transitórias e considerar diferentes - sistemas de refrigeração secundários de modo que a máxima tensão - térmica calculada não ultrapasse o limite imposto.

À medida que o U-233 (ou Th-232) é fissionado , diminue a resistência mecânica da estrutura cristalina do metal. Portanto, outro estudo de caráter experimental e de grande impor - tância seria a verificação do comportamento da tensão de limite de

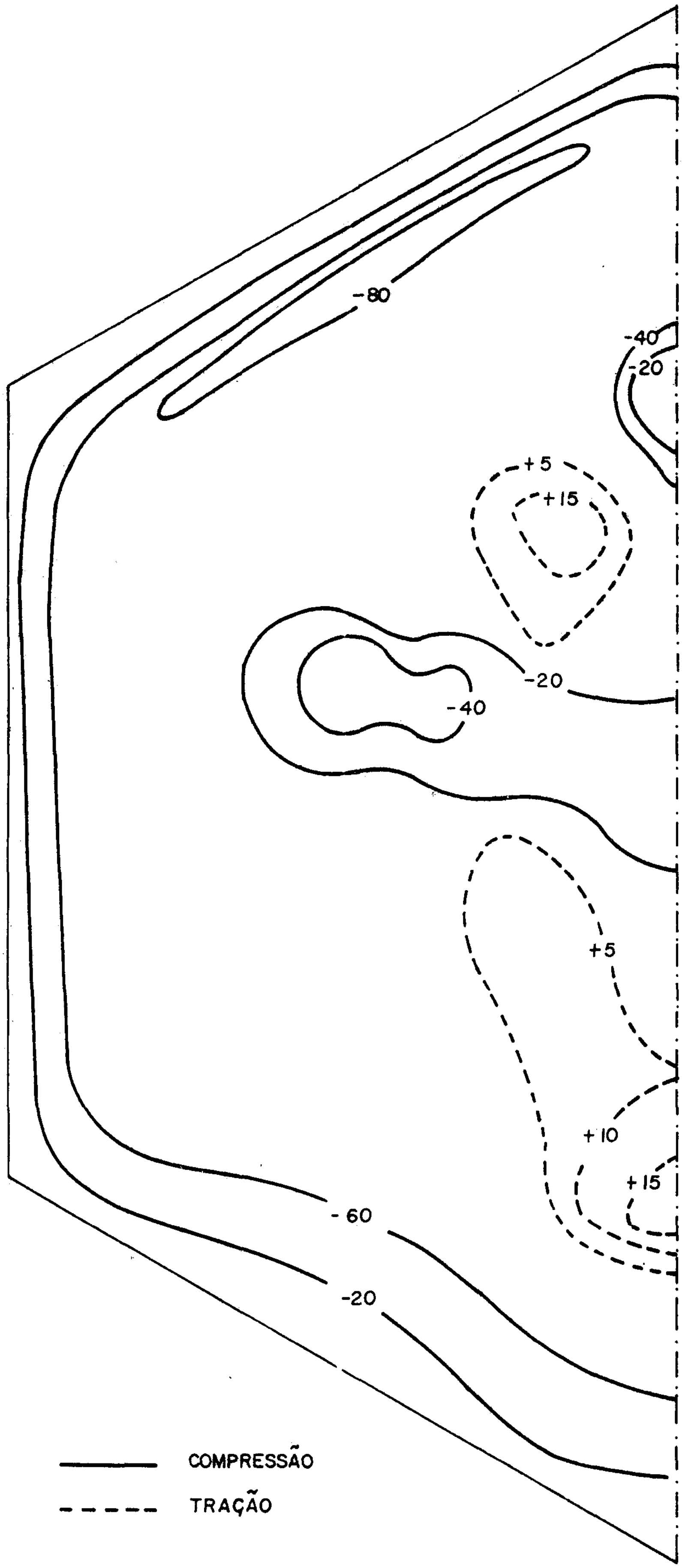


Fig. 5.4 - Tensões principais mínimas [MN/m^2]

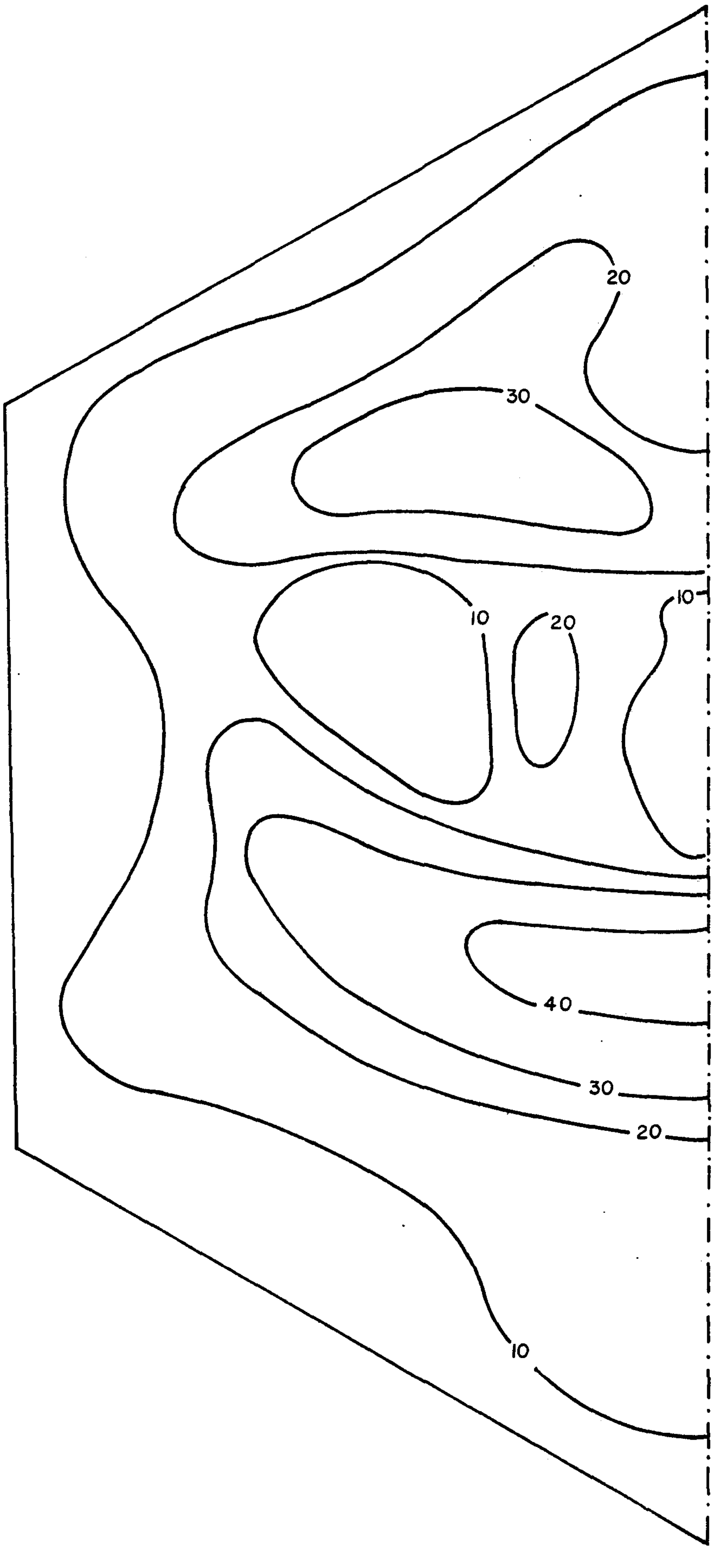


Fig. 5.5 - Tensões principais máximas (tração) $[MN/m^2]$

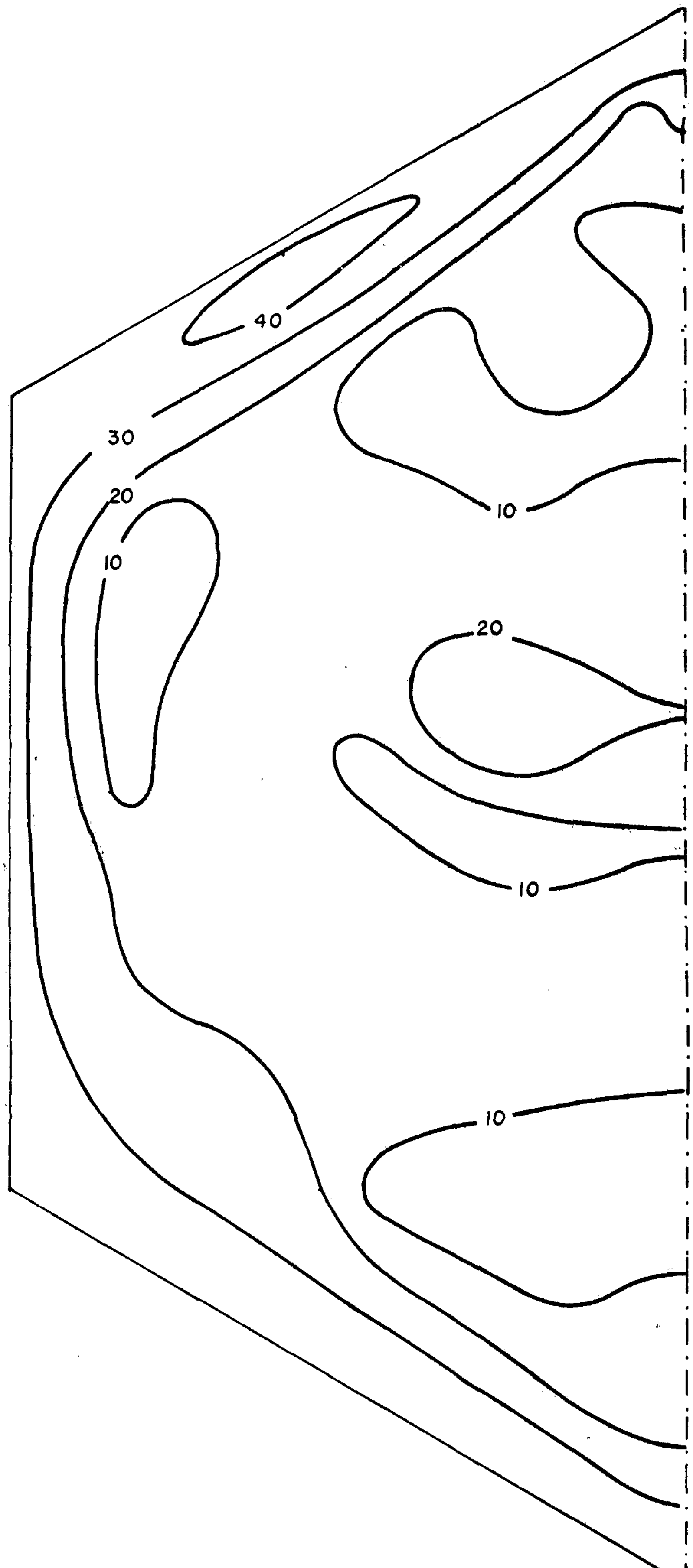


Fig. 5.6 - Máximas tensões de cisalhamento $[MN/m^2]$

proporcionalidade em função da queima de combustível.

A estimativa para o diâmetro do canal de refrigeração foi feita baseando-se em dados de projeto de GCFR que, para combustíveis óxidos, possue um perímetro "molhado" com dimensões aproximadamente iguais.

Num projeto mais detalhado seria necessária uma otimização desse diâmetro para que as perdas por bombeamento de refrigerante se tornem mínimas. Entretanto, um diâmetro pouco diferente do estimado neste estudo teria influência desprezível nos resultados obtidos.

6. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos permitem avaliar a viabilidade de uso de elementos combustíveis constituido de blocos de tório metálico no envoltório radial do GCFR protótipo de 300 MWe sob o aspecto térmico e mecânico.

As conclusões decorrentes desta avaliação são enumeradas a seguir:

1) O uso de 4 canais de refrigeração no elemento de tório metálico permite uma distribuição satisfatório de temperaturas graças ao alto coeficiente de condutividade térmica do metal. A temperatura máxima obtida é inferior a temperatura de transição de fase do tório (1400^oC).

2) Como consequência a fração volumétrica ocupada pelo material fértil no envoltório é cerca de 90%, bastante superior àquela apresentada por combustveis óxidos (50%). Pode-se reduzir assim o envoltório para apenas uma fileira de elementos combustíveis de tório metálico. O projeto original da General Atomic considera duas fileiras de elementos combustíveis de óxido de urânio ou três de óxido de tório. Além de melhor utilização do combustível, esta modificação implicaria em menores investimentos de capital em virtude da redução do tamanho do vaso de pressão.

Esta vantagem é válida também nos casos quando o elemento necessita um grande número de canais de refrigeração, por exemplo, 10 canais.

3) No estado de equilíbrio , o comportamento termo-mecânico da estrutura é satisfatório pelo critério de resistência de máxima tensão de cisalhamento. Deve-se observar , entretanto , que neste estudo não se levou em consideração a possível diminuição da tensão limite em função da queima do material por falta de informações na literatura pertinente.

APÊNDICE A - Cálculo da queda de temperatura dentro do canal de refrigeração no sentido radial através da equação de Helmholtz.

Deseja-se mostrar que a variação de temperatura é pequena dentro dos canais de refrigeração pela escolha adequada das constantes da equação de Helmholtz . Satisfaz-se assim a condição de contorno de temperatura imposta no refrigerante (Secção 3.2).

Sendo os canais de refrigeração cilíndricos de 1 cm de diâmetro , considera-se como infinito de raio R = 0,5 cm.

Na equação de Helmholtz,

$$k\nabla^2 t - bt = 0$$

fazendo $L^2 = b/k$, em coordenadas cilíndricas tem-se:

$$\frac{1}{r}\frac{d}{dr}r\frac{dt}{dr} - L^2 t = 0$$

ou

$$\frac{d^2t}{dr^2} + \frac{1}{r}\frac{dt}{dr} - L^2 t = 0 \qquad (A.1)$$

Esta é uma equação de Bessel cuja solução geral é :

$$t = AI_0(Lr) + BK_0(Lr) \qquad (A.2)$$

onde A e B são constantes a serem determinadas.

APÊNDICE A (cont.)

Pode-se escrever as seguintes condições de contorno para esta equação :

1) Temperatura finita dentro do cilindro.

2) No contorno do cilindro:

$$r = R, \quad q'' = K \left. \frac{dt}{dr} \right|_R \qquad (A.3)$$

onde k = condutividade térmica do fluido refrigerante,(watts/m^{o}C);

q'' = fluxo de calor no contorno ,(watts/m^2) .

Quando $r \to 0$, $k_o(r) \to \infty$. Pela primeira condição tem-se : $B = 0$.

Pela segunda condição tem-se:

$$A = \frac{q''_c}{K\, I'_o(LR)} \qquad (A.4)$$

onde $I'_o(r) = \frac{d}{dr} I_o(r)$

Portanto, a temperatura do fluido refrigerante é dada por :

$$t = \frac{q''_c}{K\, I'_o(LR)} I_o(Lr) \qquad (A.5)$$

Para ilustração, a Fig. A.1 mostra o comportamento de temperatura do fluido em função da distância, tendo origem no centro do canal.

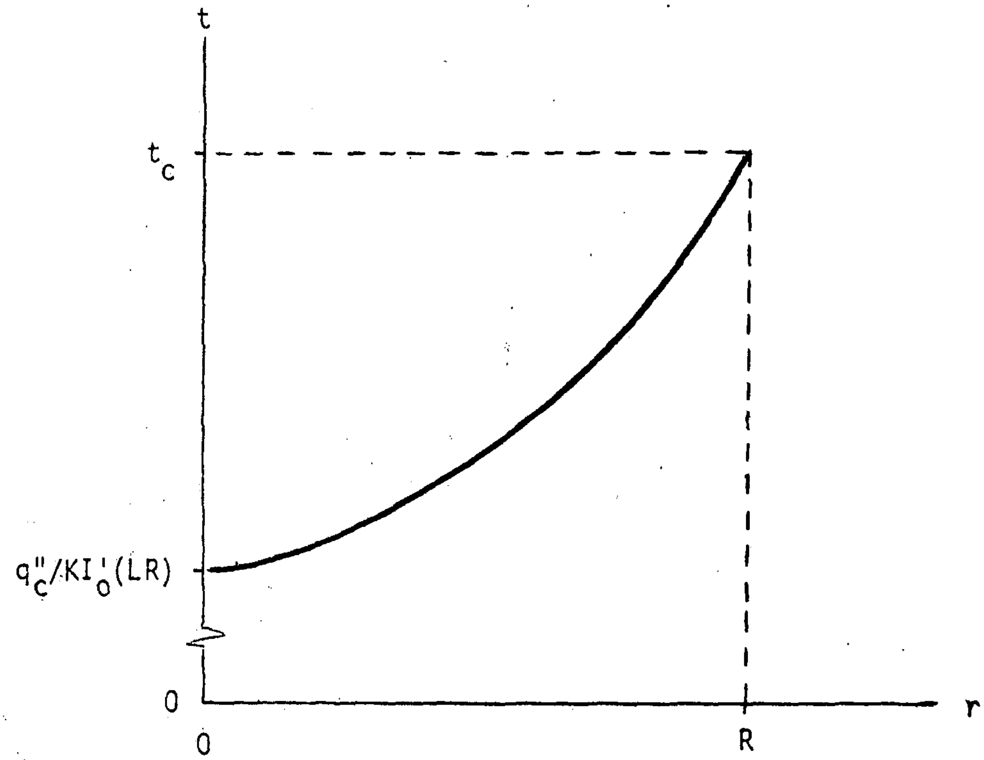


Fig. A.1 - Comportamento da temperatura dentro do canal segundo a equação de Helmholtz

Com $q_c''' = 10^4$ watts/ m^2, que é um valor típico em envoltórios de reatores rápidos , tem-se:

$$\Delta t = t_c - t_o = \frac{q_c'''}{KI_o'(LR\ )}\left[I_o(LR) - 1\right] \sim 5^oC$$

Portanto, $\Delta t = t_c - t_o$ é pequeno, como desejado.

APÊNDICE B - Equações usadas no cálculo de tensões térmicas pelo método de relaxação dinâmica

A nomenclatura utilizada é a seguinte:

A - tensão horizontal, N/m^2

C - tensão vertical , n/m^2

du - deslocamento elementar horizontal, m

dw - deslocamento elementar vertical, m

E - módulo de Young, N/m^2

i - coordenada (linha) do bloco

j - coordenada (coluna) do bloco

k_1 - fator de amortecimento viscoso horizontal

k_2 - fator de amortecimento viscoso vertical

P - força horizontal, N

ρ - densidade , kg/m^3

T - tensão de cisalhamento

T_M - máxima tensão de cisalhamento, N/m^2

t - temperatura, ^oC

u - velocidade horizontal , m/s

w - velocidade vertical , m/s

Δt - intervalo de tempo, seg.

Δx - dimensão horizontal do bloco, m

Δy - dimensão vertical do bloco, m

α - coeficiente de expansão linear, $^oC^{-1}$

ν - coeficiente de Poisson .

APÊNDICE B (cont.)

ε - elongação

σ - tensão, N/m^2

m - massa, kg

w_0 - frequência angular fundamental da estrutu - ra , S^{-1}

σ_1 - tensão principal mínima, N/m^2

σ_2 - tensão principal máxima, N/m^2

σ_T - tensão de limite de tração, N/m^2.

Seja um bloco definido pela linha i e coluna j ; (ver Fig. B.4) cuja temperatura é θ_{ij}. A Fig. B.1 mostra as forças e tensões nele exercidas.

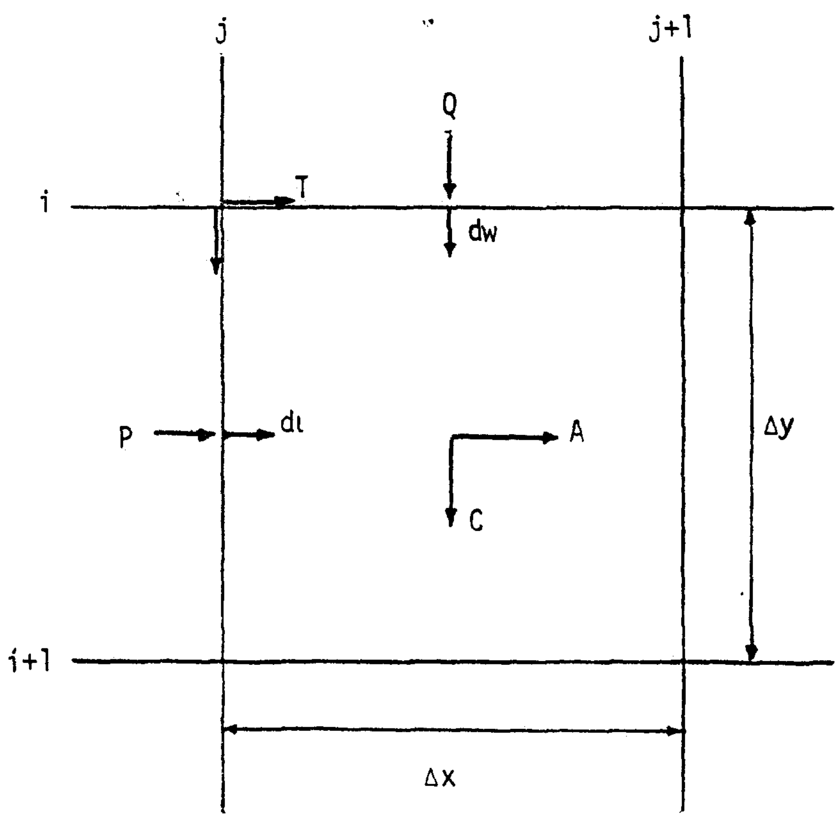


Fig. B.1 - Distribuição de tensões num bloco elementar do reticulado

APÊNDICE B (cont.)

A dedução das equações básicas para o cálculo ilustrado a seguir:

(a) Tensões horizontais e verticais A e C no bloco (i,j).

Pela superposição da lei de Hooke para tensões planas tem-se /23/:

$$\sigma_x = \frac{1}{1 - \nu^2} (\varepsilon_x - \nu\varepsilon_y)$$

Portanto, a tensão horizontal A do bloco (i,j) pode ser calculada por:

$$A_{ij} = \frac{E}{1 - \nu^2} \left[\frac{du_{ij} - du_{i,j+1}}{\Delta x} + \nu \frac{dw_{ij} - dw_{i+1,j}}{\Delta y} \right]$$

Diferenciando-se em relação ao tempo tem-se :

$$\frac{\Delta A_{ij}}{\Delta t} = \frac{E}{1-\nu^2} \left[\frac{u_{ij} - u_{i,j-1}}{\Delta x} + \nu \frac{w_{ij} - w_{i+1,j}}{\Delta y} \right]$$

Donde,

$$A^a_{ij} = A^b_{ij} + \frac{E\Delta t}{1-\nu^2} \left[\frac{u_{ij} - u_{i,j+1}}{\Delta x} + \nu \frac{w_{ij} - w_{i+1,j}}{\Delta y} \right] \qquad (B.1)$$

onde a e b são índices que representam, respectivamente, os instantes $t + \Delta t$ e t.

APÊNDICE B (cont.)

Analogamente, a tensão vertical do bloco (i,j) é dada por:

$$C^a_{ij} = C^b_{ij} + \frac{E\Delta t}{1-\nu^2}\left[\frac{w_{ij}-w_{i+1,j}}{\Delta y} + \nu\,\frac{u_{ij}-u_{i+1,j}}{\Delta x}\right] \qquad (B.2)$$

(b) Velocidades de deslocamento vertical e horizontal u e w, do bloco (i,j)

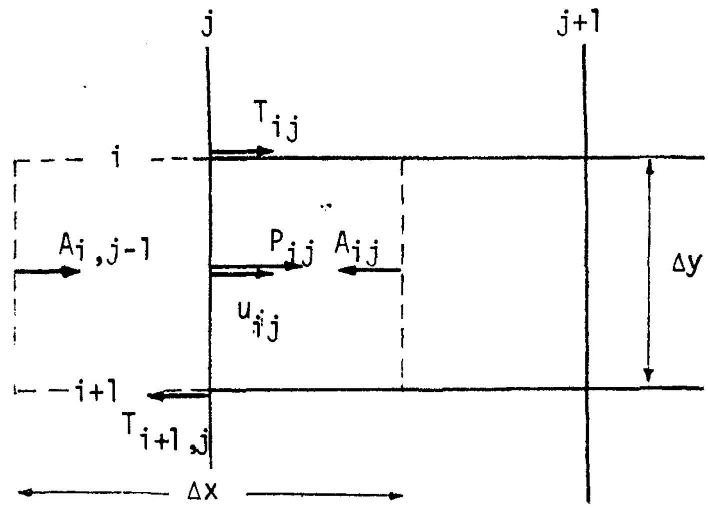


Fig. B.2 - Esquema para o cálculo da velocidade horizontal do bloco elementar.

A força horizontal total exercida no bloco tracejado mostrado na Fig. B.2 é dada por:

$$F = \frac{m}{\Delta t}\left[\Delta u_{ij} + k_1\, u_{ij}\right] \qquad (B.3)$$

onde m = massa do bloco

APÊNDICE B (cont.)

$$u_{ij} = u_{ij}^{a} - u_{ij}^{b} \tag{B.4}$$

$$u_{ij} = \frac{u_{ij}^{a} - u_{ij}^{b}}{2} \tag{B.5}$$

Das Eqs. B.3, B.4 e B.5, pode-se deduzir que :

$$\left[A_{i,j-1} - A_{ij} - P_{ij} \right] \Delta y + \left[T_{ij} - T_{i+1,j} \right] \Delta x$$

$$= \frac{\rho \Delta x \Delta y}{\Delta t} \left[u_{ij}^{a} \left(1 + \frac{k_1}{2} \right) - u_{ij}^{b} \left(1 - \frac{k_1}{2} \right) \right]$$

Donde,

$$u_{ij}^{a} = \frac{1-k_1/2}{1+k_1/2} u_{ij}^{b} + \frac{1}{1 + k_1/2} \frac{\Delta t}{\rho}$$

$$\times \left[\frac{A_{i,j-1} - A_{ij} + P_{ij}}{\Delta x} + \frac{T_{ij} - T_{i+1,j}}{\Delta y} \right] \tag{B.6}$$

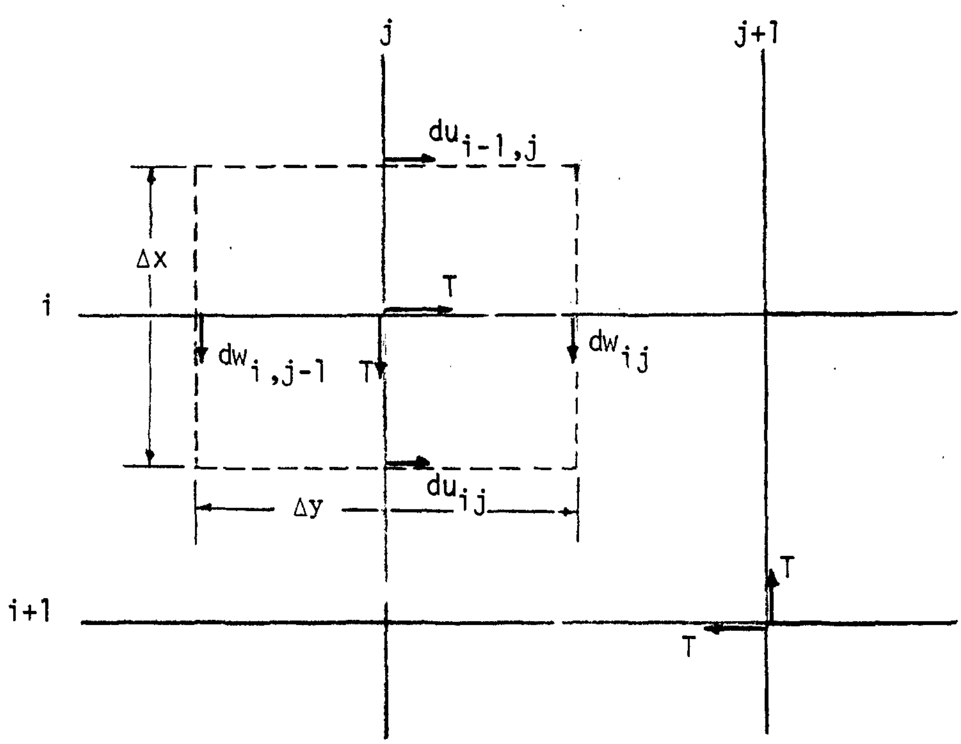
Analogamente,

APÊNDICE B (cont.)

$$w^a_{ij} = \frac{1 - k_2/2}{1 + k_2/2}\, w^b_{ij} + \frac{1}{1 + k_1/2}\, \frac{\Delta t}{\rho}$$

$$\times \left[\frac{Q_{ij} + C_{i-1,j} - C_{ij}}{\Delta y} + \frac{T_{ij} - T_{i,j+1}}{\Delta x} \right] \qquad \text{(B.7)}$$

(c) Tensão de cisalhamento T do bloco (i,j)



Fib. B.3 - Esquema para o cálculo da tensão de cisalhamento do bloco elementar.

APÊNDICE B (cont.)

A relação entre tensão diferencial de cisalhamento (shearing stress) e tensão de cisalhamento é dada pela constante G, definida como módulo de rigidez.

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

Para tensões planas, a tensão diferencial de cisalhamento , γ , é dada por :

$$\gamma = \varepsilon_x + \varepsilon_y = \frac{\Delta du}{\Delta x} - \frac{\Delta dw}{\Delta y}$$

Utilizando-se o bloco tracejado da Fig. B.3, tem-se:

$$T_{ij} = G\gamma = \frac{E}{2(1+\nu)} \left[\frac{du_{i-1,j} - du_{ij}}{\Delta y} + \frac{dw_{i,j-1} - dw_{i,j}}{\Delta x} \right]$$

Diferenciando-se em relação ao tempo, chega-se a

$$T^a_{ij} = T^b_{ij} + \frac{E\Delta t}{2(1+ \nu)} \left[\frac{u_{i-1,j} - u_{ij}}{\Delta y} + \frac{w_{i,j-1} - w_{ij}}{\Delta x} \right] \qquad (B.8)$$

Para iniciar os cálculos faz-se necessária uma estimativa inicial das tensões horizontais e verticais , A^o_{ij} e C^o_{ij} , resultantes da temperatura θ_{ij} /24/ que é dada por:

APÊNDICE B (cont.)

$$A^o_{ij} = C^o_{ij} = \frac{\alpha E \theta_{ij}}{1 - \nu}$$

As demais tensões, velocidades e deslocamentos iniciais são nulos. Quanto ao intervalo de tempo Δt, existem vários métodos para se calcular o valor apropriado. Para uma estrutura de tensões planas , Δt é dado pela expressão / 3/:

$$\Delta t \leq \sqrt{\frac{\rho}{(\lambda + 2\mu)} \Bigg/ \left[\frac{1}{(\Delta x)^2} + \frac{1}{(\Delta y)^2}\right]} \qquad (B.9)$$

onde $\lambda = \dfrac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}$

$$\mu = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

O fator de amortecimento viscoso , k , que é diretamente proporcional a Δt, deve ser um pouco menor do que o valor crítico ($k_{crítico} = 2w_o\Delta t$) / 3 / .

Pode-se então calcular N, o número mínimo requerido de iterações:

$$N \times \Delta t = T = \frac{2\pi}{w_o}$$

$$k \simeq 2w_o\Delta t$$

APÊNDICE B (cont).

$$N \simeq \frac{4\pi}{k}$$

As equações básicas (B.1), (B.2), (B.6), (B.7) e (B.8) foram deduzidas para um bloco cercado por outros blocos do mesmo material. Para blocos que contem condições de contorno diferentes, algumas das equações relacionadas devem ser modificadas. Na malha adotada neste estudo, há 25 tipos de blocos cujas condições de contorno são diferentes entre si. Apresenta-se a seguir a relação de todas as equações usadas. Cada equação corresponde a um ou mais tipos de blocos. Posteriormente mostra-se cada bloco com suas condições de contorno específicas e as equações correspondentes.

APÊNDICE B (cont.)

$$u^a_{ij} = \frac{1-k_1/2}{1+k_1/2}\, u^b_{ij} + \frac{1}{1+k_1/2}\, \frac{\Delta t}{\rho} \left[\frac{A_{i,j-1} - A_{ij} + P_{ij}}{\Delta x} + \frac{T_{ij} - T_{i+1,j}}{\Delta y} \right] \quad (B.1.u)$$

$$w^a_{ij} = \frac{1-k_2/2}{1+k_2/2}\, w^b_{ij} + \frac{1}{1+k_2/2}\, \frac{\Delta t}{\rho} \left[\frac{Q_{ij} + C_{i-1,j} - C_{ij}}{\Delta y} + \frac{T_{ij} - T_{i,j+1}}{\Delta x} \right] \quad (B.1.w)$$

$$A^a_{ij} = A^b_{ij} + \frac{E\Delta t}{1-\nu^2} \left[\frac{u_{ij} - u_{i,j+1}}{\Delta x} + \nu\, \frac{w_{ij} - w_{i+1}}{\Delta y} \right] \quad (B.1.A)$$

$$C^a_{i} = C^b_{ij} + \frac{E\Delta t}{1-\nu^2} \left[\frac{w_{ij} - w_{i+1,j}}{\Delta y} + \nu\, \frac{u_{ij} - u_{i,j-1}}{\Delta x} \right] \quad (B.1.B)$$

$$T^a_{i} = T^b_{ij} + \frac{E\Delta t}{1-\nu^2} \left[\frac{u_{i-1,j} - u_{ij}}{\Delta y} + \frac{w_{i,j-1} - w_{ij}}{\Delta x} \right] \quad (B.1.T)$$

$$w^a_{ij} = \frac{1-k_2/2}{1+k_2/2}\, w^b_{ij} + \frac{2}{1+k_2/2}\, \frac{\Delta t}{\rho} \left[\frac{Q_{ij} - C_{ij}}{\Delta y} + \frac{T_{i+1,j} - T_{i+1,j+1}}{4\Delta x} \right] \quad (B.2.w)$$

$$u^a_{ij} = \frac{1-k_1/2}{1+k_1/2}\, u^b_{ij} + \frac{2}{1+k_1/2}\, \frac{\Delta t}{\rho} \left[\frac{A_{i,j-1} + P_{ij}}{\Delta x} + \frac{T_{i,j-1} - T_{i+1,j-1}}{4\Delta y} \right] \quad (B.3.u)$$

APÊNDICE B (cont)

$$w_{ij}^{a} = \frac{1-k_2/2}{1+k_2/2}\, w_{ij}^{b} + \frac{2}{1+k_2/2}\,\frac{\Delta t}{\rho}\left[\frac{C_{i-1,j}+Q_{ij}}{\Delta y} + \frac{T_{i-1,j}-T_{i-1,j+1}}{4\Delta x}\right] \quad (B.4.w)$$

$$u_{ij}^{a} = \frac{1-k_1/2}{1+k_1/2}\, u_{ij}^{b} + \frac{2}{1+k_1/2}\,\frac{\Delta t}{\rho}\left[\frac{P_{ij}-A_{ij}}{\Delta x} + \frac{T_{i,j+1}-T_{i+1,j+1}}{4\Delta y}\right] \quad (B.10.u)$$

$$w_{ij}^{a} = \frac{1-k_2/2}{1+k_2/2}\, w_{ij}^{b} + \frac{1}{1+k_2/2}\,\frac{\Delta t}{\rho}\left[\frac{Q_{ij}+C_{i-1,j}-C_{ij}}{\Delta y} + \frac{2T_{ij}-T_{i,j+i}}{2\Delta x}\right] \quad (B.11.w)$$

$$u_{ij}^{a} = \frac{1-k_1/2}{1+k_1/2}\, u_{ij}^{b} + \frac{1}{1+k_1/2}\,\frac{\Delta t}{\rho}\left[\frac{A_{i,j-1}+P_{ij}-A_{ij}}{\Delta x} + \frac{2T_{ij}-T_{i+1,j}}{2\Delta y}\right] \quad (B.13.u)$$

$$u_{ij}^{a} = \frac{1-k_1/2}{1+k_1/2}\, u_{ij}^{b} + \frac{1}{1+k_1/2}\,\frac{\Delta t}{\rho}\left[\frac{P_{ij}+A_{i,j-1}-A_{ij}}{\Delta x} + \frac{2T_{ij}-T_{i+1,j}}{2\Delta y}\right] \quad (B.16.u)$$

$$u_{ij}^{a} = \frac{1-k_1/2}{1+k_1/2}\, u_{ij}^{b} + \frac{2}{1+k_1/2}\,\frac{\Delta t}{\rho}\left[\frac{P_{ij}-A_{ij}}{\Delta x} + \frac{2T_{ij}-T_{i+1,j+1}}{4\Delta y}\right] \quad (B.17.u)$$

$$w_{ij}^{a} = \frac{1-k_2/2}{1+k_2/2}\, w_{ij}^{b} + \frac{1}{1+k_2/2}\,\frac{\Delta t}{\rho}\left[\frac{Q_{ij}+C_{i-1,j}-C_{ij}}{\Delta y} + \frac{T_{ij}-2T_{i,j+1}}{2\Delta x}\right] \quad (B.17.w)$$

APÊNDICE B (cont.)

$$T^a_{ij} = T^b_{ij} + \frac{E\Delta t}{2(1+\nu)}\left[\frac{u_{i-1,j}-u_{ij}}{\Delta y} + \frac{w_{i,j-1}-w_{ij}}{\Delta x}\right] x\ 0.33 \qquad (B.17.T)$$

$$u^a_{ij} = \frac{1-k_1/2}{1+k_1/2}\, u^b_{ij} + \frac{2}{1+k_1/2}\,\frac{\Delta t}{\rho}\left[\frac{P_{ij}-A_{ij}}{\Delta x} - \frac{T_{i+1,j+1}}{4\Delta y}\right] \qquad (B.26.u)$$

$$w^a_{ij} = \frac{1-k_2/2}{1+k_2/2}\, w^b_{ij} + \frac{2}{1+k_2/2}\,\frac{\Delta t}{\rho}\left[\frac{Q_{ij}+C_{i-1,j}}{\Delta y} - \frac{T_{i,j-1}}{2\Delta x}\right] \qquad (B.26.w)$$

$$u^a_{ij} = \frac{1-k_1/2}{1+k_1/2}\, u^b_{ij} + \frac{1}{1+k_1/2}\,\frac{\Delta t}{\rho}\left[\frac{P_{ij}+A_{i,j-1}-A_{ij}}{\Delta x} + \frac{T_{ij}-2T_{i+1,j}}{2\Delta y}\right] \qquad (B.27.u)$$

$$w^a_{ij} = \frac{1-k_2/2}{1+k_2/2}\, w^b_{ij} + \frac{1}{1+k_2/2}\,\frac{\Delta t}{\rho}\left[\frac{Q_{ij}+C_{i-1,j}-C_{ij}}{\Delta y} + \frac{T_{ij}-2T_{i,j+1}}{2\Delta x}\right] \qquad (B.27.w)$$

$$T^a_{ij} = T^b_{ij} + \frac{E\Delta t}{2(1+\nu)}\left[\frac{u_{i-1,j}-u_{i,j}}{\Delta y} + \frac{w_{i,j+1}-w_{i,j}}{\Delta x}\right] x\ 0.33 \qquad (B.27.T)$$

$$w^a_{ij} = \frac{1-k_2/2}{1+k_2/2}\, w^b_{ij} + \frac{2}{1+k_2/2}\,\frac{\Delta t}{\rho}\left[\frac{Q_{ij}-C_{ij}}{\Delta y} + \frac{T_{ij}}{2\Delta x}\right] \qquad (B.30.w)$$

APÊNDICE B (cont.)

$$w_{ij}^{a} = \frac{1-k_2/2}{1+k_2/2}\, w_{ij}^{b} + \frac{2}{1+k_2/2}\,\frac{\Delta t}{\rho}\left[\frac{Q_{ij}-C_{ij}}{\Delta y} + \frac{2T_{ij}-T_{i+1,j+1}}{4\Delta x}\right] \qquad \text{(B.33.W)}$$

$$u_{ij}^{a} = \frac{1-k_1/2}{1+k_1/2}\, u_{ij}^{b} + \frac{2}{1+k_1/2}\,\frac{\Delta t}{\rho}\left[\frac{P_{ij}-A_{ij}}{\Delta x} + \frac{T_{i,j+1}}{4\Delta y}\right] \qquad \text{(B.37.u)}$$

$$u_{ij}^{a} = \frac{1-k_1/2}{1+k_1/2}\, u_{ij}^{b} + \frac{2}{1+k_1/2}\,\frac{\Delta t}{\rho}\left[\frac{P_{ij}-A_{ij}}{\Delta x} + \frac{T_{ij}}{2\Delta y}\right] \qquad \text{(B.40.w)}$$

$$u_{ij}^{a} = \frac{1-k_1/2}{1+k_1/2}\, u_{ij}^{b} + \frac{2}{1+k_1/2}\,\frac{\Delta t}{\rho}\left[\frac{P_{ij}-A_{ij}}{\Delta x} - \frac{T_{i+1,j}}{2\Delta y}\right] \qquad \text{(B.41.u)}$$

$$w_{ij}^{a} = \frac{1-k_2/2}{1+k_2/2}\, w_{ij}^{b} + \frac{2}{1+k_2/2}\,\frac{\Delta t}{\rho}\left[\frac{Q_{ij}-C_{ij}}{\Delta y} - \frac{T_{i+1,j+1}}{4\Delta x}\right] \qquad \text{(B.41.w)}$$

$$u_{ij}^{a} = \frac{1-k_1/2}{1+k_1/2}\, u_{ij}^{b} + \frac{2}{1+k_1/2}\,\frac{\Delta t}{\rho}\left[\frac{A_{i,j-1}+P_{ij}}{\Delta y} + \frac{2T_{ij}-T_{i+1,j-1}}{4\Delta y}\right] \qquad \text{(B.43.u)}$$

$$w_{ij}^{a} = \frac{1-k_2/2}{1+k_2/2}\, w_{ij}^{b} + \frac{2}{1+k_2/2}\,\frac{\Delta t}{\rho}\left[\frac{Q_{ij}+C_{i-1,j}}{\Delta y} + \frac{2T_{ij}}{4\Delta x}\right] \qquad \text{(B.43.w)}$$

APÊNDICE B (cont.)

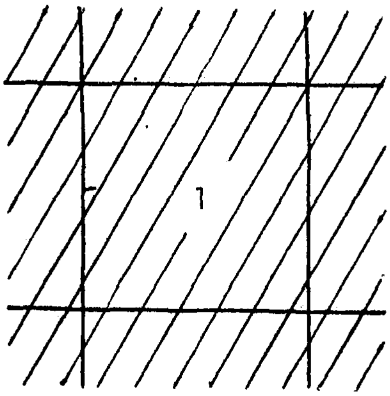
$$w^{a}_{ij} = \frac{1-k_2/2}{1+k_2/2}\, w^{b}_{ij} + \frac{2}{1+k_2/2}\ \frac{\Delta t}{\rho}\left[\frac{C_{i-1,j}+Q_{i,j}}{\Delta y} - \frac{T_{i,j+1}}{4\Delta x}\right] \qquad (B.44.w)$$

$$w^{a}_{ij} = \frac{1-k_2/2}{1+k_2/2}\, w^{b}_{ij} + \frac{2}{1+k_2/2}\ \frac{\Delta t}{\rho}\left[\frac{T_{i-1,j} - 2T_{i,j+1}}{4\Delta x}\right] \qquad (B.45.w)$$

$$u^{a}_{ij} = \frac{1-k_1/2}{1+k_1/2}\, u^{b}_{ij} + \frac{2}{1+k_1/2}\ \frac{\Delta t}{\rho}\left[\frac{A_{i,j-1}+P_{ij}}{\Delta x} + \frac{2T_{ij}}{4\Delta y}\right] \qquad (B.47.u)$$

$$w^{a}_{ij} = \frac{1-k_2/2}{1+k_2/2}\, w^{b}_{ij} + \frac{2}{1+k_2/2}\ \frac{\Delta t}{\rho}\left[\frac{C_{i-1,j}+Q_{ij}}{\Delta y} + \frac{2T_{ij}-T_{i-1,j+1}}{4\Delta x}\right] \qquad (B.47.w)$$

PÊNDICE B (cont.)



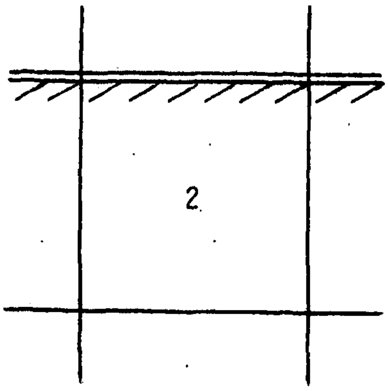
u_{ij}^{a} eq. (B.1.u)

w_{ij}^{a} eq. (B.1.w)

A_{ij}^{a} eq. (B.1.A)

C_{ij}^{a} eq. (B.1.C)

T_{ij}^{a} eq. (B.1.T)



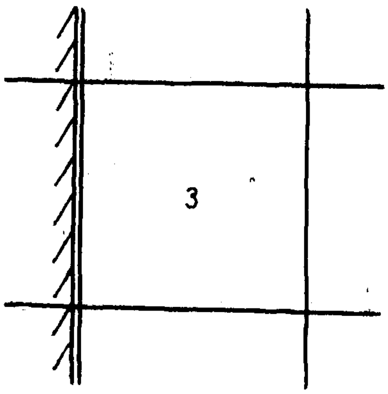
u_{ij}^{a} eq. (B.1.u)

w_{ij}^{a} eq. (B.2.w)

A_{ij}^{a} eq. (B.1.A)

C_{ij}^{a} eq. (B.1.C)

$T_{ij}^{a} = 0$.



u_{ij}^{a} eq. (B.3.u)

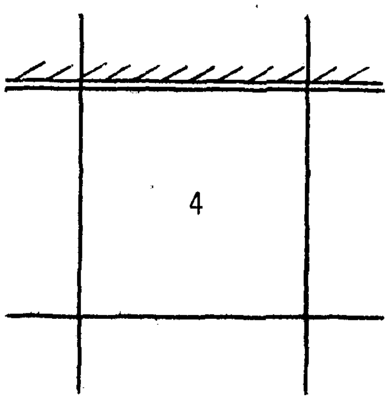
$w_{ij}^{a} = 0$

$A_{ij}^{a} = 0$

$C_{ij}^{a} = 0$

$T_{ij}^{a} = 0$

APÊNDICE B (cont.)



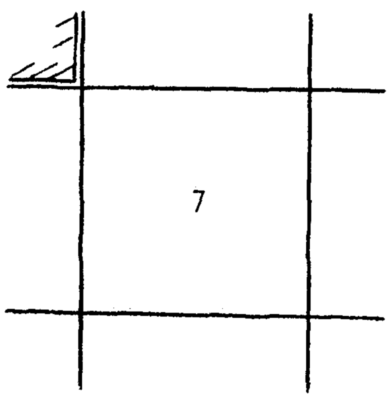
$u^a_{ij} = 0$

w^a_{ij} eq. (B.4.w)

$A^a_{ij} = 0$

$C^a_{ij} = 0$

$T^a_{ij} = 0$



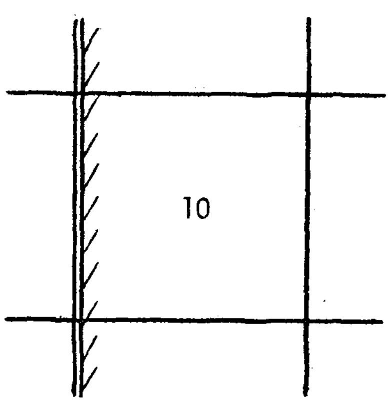
$u^a_{ij} = 0$

$w^a_{ij} = 0$

$A^a_{ij} = 0$

$C^a_{ij} = 0$

$T^a_{ij} = 0$



u^a_{ij} eq. (B.10.u)

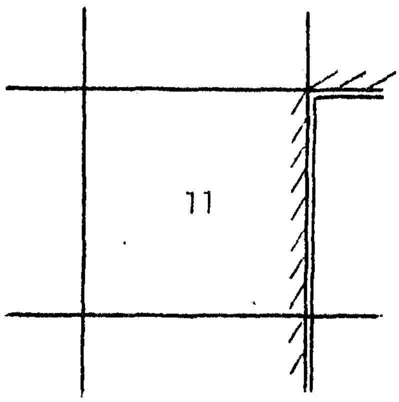
w^a_{ij} eq. (B.1.w)

A^a_{ij} eq. (B.1.A)

C^a_{ij} eq. (B.1.C)

$T^a_{ij} = 0$

APÊNDICE B (cont.)



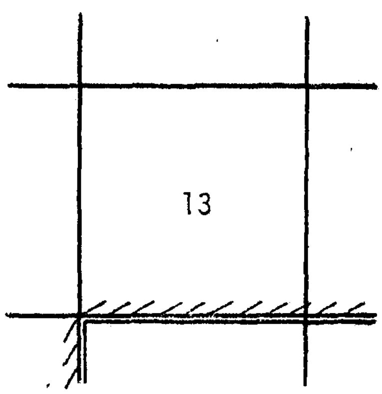
u^a_{ij} eq. (B.1.u)

w^a_{ij} eq. (B.11.w)

A^a_{ij} eq. (B.1.A)

C^a_{ij} eq. (B.1.C)

T^a_{ij} eq. (B.1.T)



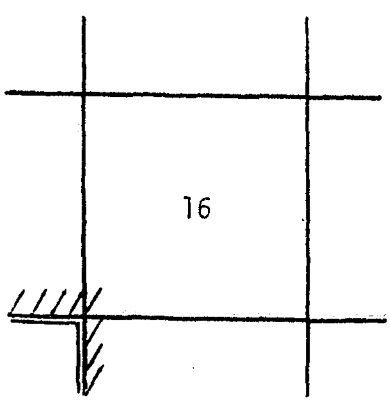
u^a_{ij} eq. (B.13.u)

w^a_{ij} eq. (B.1.w)

A^a_{ij} eq. (B.1.A)

C^a_{ij} eq. (B.1.C)

T^a_{ij} eq. (B.1.T)



u^a_{ij} eq. (B.16.u)

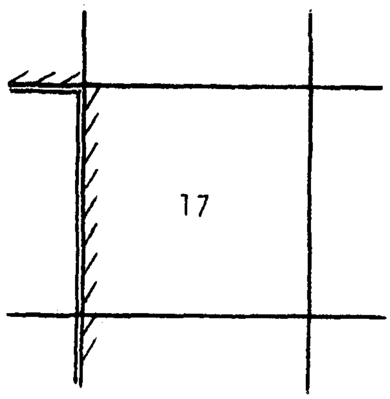
w^a_{ij} eq. (B.1.w)

A^a_{ij} eq. (B.1.A)

C^a_{ij} eq. (B.1.C)

T^a_{ij} eq. (B.1.T)

APÊNDICE B (cont.)



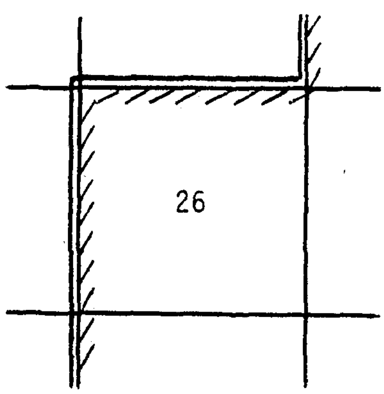
u^a_{ij} eq. (B.17.u)

w^a_{ij} eq. (B.17.w)

$A^a_{ij} = 0$

$C^a_{ij} = 0$

T^a_{ij} eq. (B.17.T)



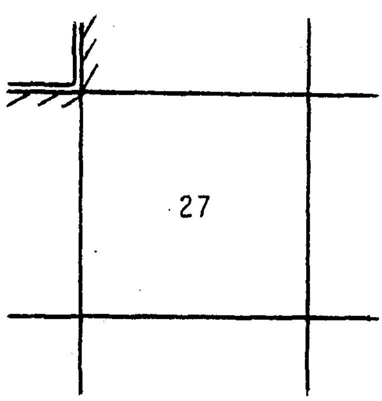
u^a_{ij} eq. (B.26.u)

w^a_{ij} eq. (B.26.w)

A^a_{ij} eq. (B.1.A)

C^a_{ij} eq. (B.1.C)

$T^a_{ij} = 0$



u^a_{ij} eq. (B.27.u)

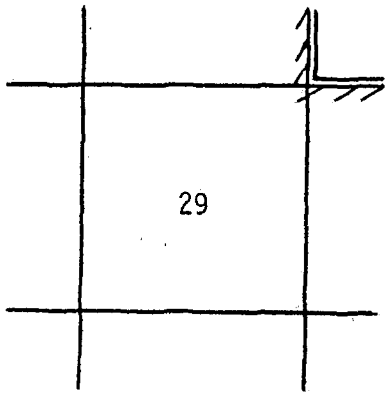
w^a_{ij} eq. (B.27.w)

A^a_{ij} eq. (B.1.A)

C^a_{ij} eq. (B.1.C)

T^a_{ij} eq. (B.27.T)

APÊNDICE B (cont.)



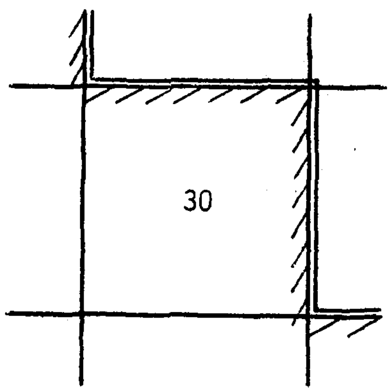
u^a_{ij} eq. (B.1.u)

w^a_{ij} eq. (B.11.w)

A^a_{ij} eq. (B.1.A)

C^a_{ij} eq. (B.1.C)

T^a_{ij} eq. (B.1.T)



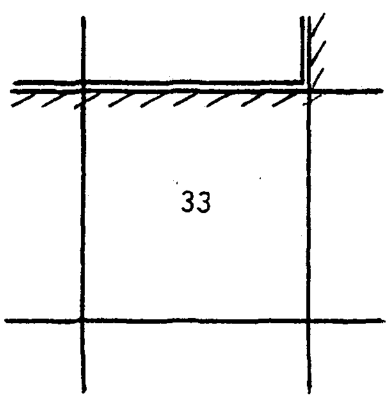
u^a_{ij} eq. (B.27.u)

w^a_{ij} eq. (B.30.w)

A^a_{ij} eq. (B.1.A)

C^a_{ij} eq. (B.1.C)

T^a_{ij} eq. (B.27.T)



u^a_{ij} eq. (B.27.u)

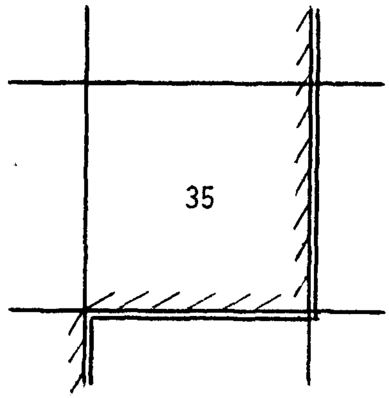
w^a_{ij} eq. (B.33.w)

A^a_{ij} eq. (B.1.A)

C^a_{ij} eq. (B.1.C)

T^a_{ij} eq. (B.27.T)

APÊNDICE B (cont.)



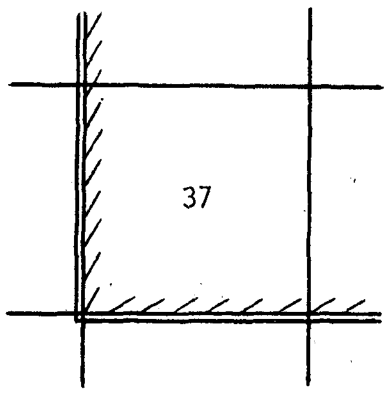
u^a_{ij} eq. (B.13.u)

w^a_{ij} eq. (B.1.w)

A^a_{ij} eq. (B.1.A)

C^a_{ij} eq. (B.1.C)

T^a_{ij} eq. (B.1.T)



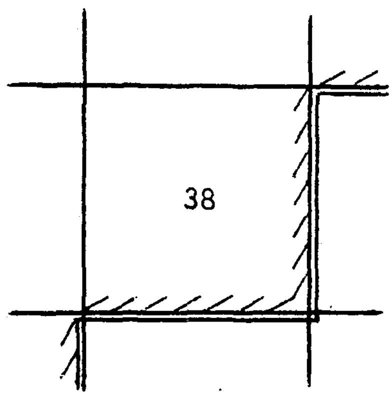
u^a_{ij} eq. (B.37.u)

w^a_{ij} eq. (B.1.w)

A^a_{ij} eq. (B.1.A)

C^a_{ij} eq. (B.1.C)

$T^a_{ij} = 0$



u^a_{ij} eq. (B.13.u)

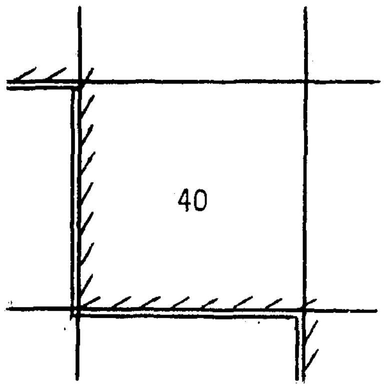
w^a_{ij} eq. (B.11.w)

A^a_{ij} eq. (B.1.A)

C^a_{ij} eq. (B.1.C)

T^a_{ij} eq. (B.1.T)

APÊNDICE B (cont.)



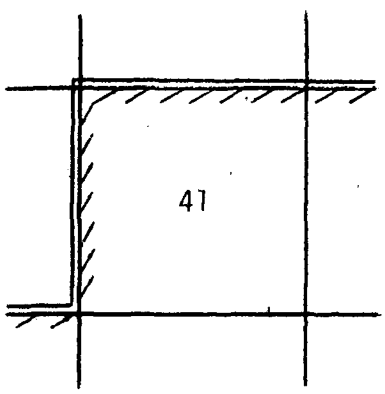
u_{ij}^{a} eq. (B.40.u)

w_{ij}^{a} eq. (B.11.w)

A_{ij}^{a} eq. (B.1.A)

C_{ij}^{a} eq. (B.1.C)

T_{ij}^{a} eq. (B.17.T)



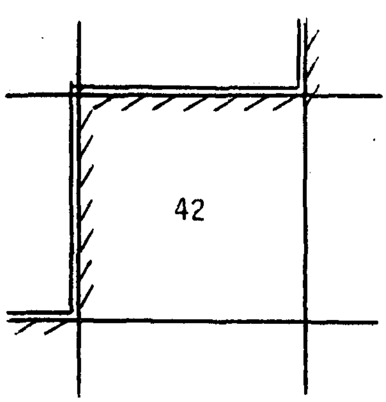
u_{ij}^{a} eq. (B.41.u)

w_{ij}^{a} eq. (B.41.u)

A_{ij}^{a} eq. (B.1.A)

C_{ij}^{a} eq. (B.2.C)

$T_{ij}^{a} = 0$



u_{ij}^{a} eq. (B.41.u)

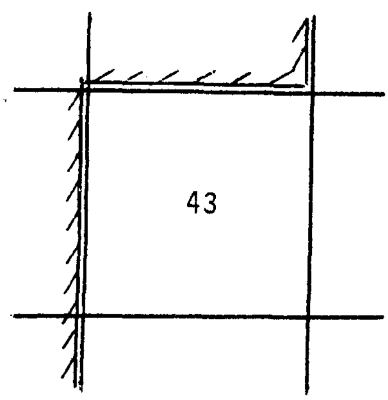
w_{ij}^{a} eq. (B.26.w)

A_{ij}^{a} eq. (B.1.A)

C_{ij}^{a} eq. (B.1.C)

$T_{ij}^{a} = 0$

APÊNDICE B (cont.)



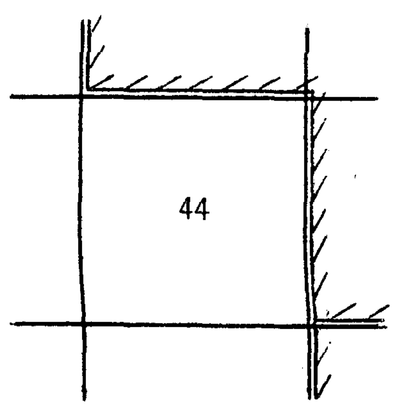
u^a_{ij} eq. (B.43.u)

w^a_{ij} eq. (B.43.w)

A^a_{ij} eq. (B.1.A)

C^a_{ij} eq. (B.1.C)

T^a_{ij} eq. (B.17.T)



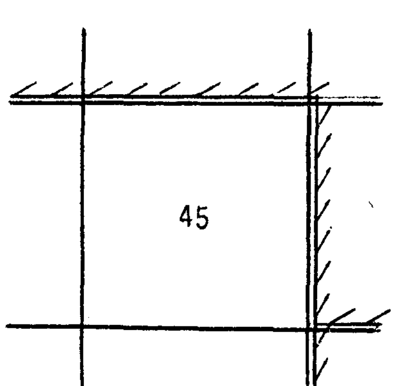
$u^a_{ij} = 0$

w^a_{ij} eq. (B.44.w)

A^a_{ij} eq. (B.1.A)

C^a_{ij} eq. (B.1.C)

$T^a_{ij} = 0$



$u^a_{ij} = 0$

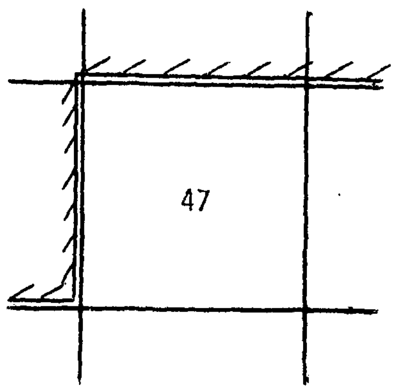
w^a_{ij} eq. (B.45.w)

A^a_{ij} eq. (B.1.A)

C^a_{ij} eq. (B.1.C)

$T^a_{ij} = 0$

APÊNDICE B (cont.)



u^a_{ij} eq. (B.47.u)

w^a_{ij} eq. (B.47.w)

A^a_{ij} eq. (B.1.A)

C^a_{ij} eq. (B.1.C)

T^a_{ij} eq. (B.43.T)

APÊNDICE B (cont.)

Para o critério de convergência empregou-se o valor da velocidade horizontal do bloco (28,1) e o da velocidade vertical do bloco (99,41) (Ver Fig. B.4), que fornecem uma indicação do estado dinâmico da estrutura. Quando ambas tendem a zero, examina-se os valores de velocidade horizontal e vertical dos demais blocos verificando-se a estrutura atingiu o repouso . Caso isto aconteça , os valores de tensões calculados correspondem aos de equilíbrio e o cálculo está encerrado.

As tensões principais máximas e mínimas de cada bloco foram obtidas pelas seguintes equações /2/ :

$$\sigma_1 = \frac{A_{ij} + C_{ij}}{2} + \sqrt{\left(\frac{A_{ij} - C_{ij}}{2}\right)^2 + \bar{T}_{ij}^2}$$

$$\sigma_2 = \frac{A_{ij} + C_{ij}}{2} - \sqrt{\left(\frac{A_{ij} - C_{ij}}{2}\right)^2 + \bar{T}_{ij}^2}$$

onde $\bar{T}_{ij}$ é a tensão de cisalhamento médio do bloco (i,j)que é dada por:

$$\bar{T}_{ij} = \frac{T_{ij}+T_{i+1,j}+T_{i,j+1}+T_{i+1,j+1}}{4}$$

4	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
5	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	41
6	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	42	27
7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	41	33	27	1
8	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	41	33	27	1	1	1
9	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	42	27	1	1	1	1	1
10	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	41	33	27	1	1	1	1	1	1
11	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	41	33	27	1	1	1	1	1	1	1	1
12	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	41	33	27	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
13	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	42	27	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
14	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	41	33	27	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
15	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	41	33	27	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
16	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	42	27	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
17	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	41	33	27	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
18	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	41	33	27	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
19	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	41	33	27	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
20	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	42	27	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
21	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	41	33	27	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
22	7	7	7	7	7	7	7	7	7	41	33	27	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
23	7	7	7	7	7	7	7	7	33	27	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
24	7	7	7	7	7	7	41	33	27	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
25	7	7	7	7	41	33	27	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
26	7	7	41	33	27	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
27	7	42	27	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	11
28	26	27	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	8
29	10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	8
30	10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	29
31	10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
32	10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
33	10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
34	10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
35	10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
36	10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
37	10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
38	10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
39	10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
40	10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	13	20	20	16	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
41	10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	38	47	4	45	40	16	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
42	10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	11	43	7	7	7	44	17	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
43	10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	8	3	7	7	7	7	10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
44	10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	8	3	7	7	7	7	36	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
45	10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	29	30	3	7	7	42	27	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
46	10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	29	34	2	33	27	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
47	10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
48	10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
49	10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
50	10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
51	10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
52	10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	11
53	10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	8
54	10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	8
55	10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	29
56	10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
57	10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
58	10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
59	10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
60	10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
61	10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
62	10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
63	10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
64	10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
65	10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
66	10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
67	10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
68	10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
69	10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
70	10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
71	10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
72	10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
73	10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
74	10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
75	37	16	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
76	4	40	16	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
77	7	4	40	20	16	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
78	7	7	4	45	40	20	16	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
79	7	7	7	7	4	45	40	20	16	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
80	7	7	7	7	7	7	4	45	40	16	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
81	7	7	7	7	7	7	7	7	4	40	20	16	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
82	7	7	7	7	7	7	7	7	7	4	45	40	20	16	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
83	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	4	45	40	16	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
84	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	4	40	20	16	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
85	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	4	45	40	20	16	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
86	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	4	45	40	20	16	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
87	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	4	45	40	16	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
88	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	4	40	20	16	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
89	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	4	45	40	20	16	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
90	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	4	45	40	16	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
91	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	4	40	20	16	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
92	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	4	45	40	20	16	1	1	1	1	1	1	1	1
93	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	4	45	40	20	16	1	1	1	1	1	1
94	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	4	45	40	16	1	1	1	1	1
95	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	4	40	20	16	1	1	1
96	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	4	45	40	20	16	1
97	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	4	45	40	16
98	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	4	40
99	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	4
100	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
101	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39

INCREMENTO X 2.000E-03 M

INCREMENTO Y 2.000E-03 M

Fig. B.4 - Zoneamento

APÊNDICE C - Programa PV1

C.1 - Cartões de entrada

Cartão 1 (2I3) - IOP1,IOP2

IOP1 - Opção para gravar os valores finais no arquivo 10. Exercida se IOP1   0.

IOP2 - Opção para ler os dados iniciais no arquivo 10. Exercida se IOP2   0.

Cartão 2 (6I3) - IM,JM,IG1,JG1,IG2,JG2

IM - Número de linhas

JM - Número de colunas

IG1,JG1 - Respectivamente, linha e coluna do bloco cuja velocidade horizontal servirá para indicar o estado dinâmico do sistema.

IG2,JG2 - Idem, velocidade vertical.

Cartão 3 (2I3) - LDEL,MEND

LDEL - A cada LDEL iterações serão impressas as velocidades horizontal e vertical dos blocos (IG1,JG1),(IG2,JG2), respectivamente.

LDEL*MEND - Número máximo de iterações para o "job".

APÊNDICE C (cont).

Cartão 4 (6E12.3/6E12.3) - TDEL;DAMP1,DAMP2,RHO,
ELAST,POISS,XDEL,YDEL,
ALFA

TDEL - incremento de tempo entre duas itera
ções.

DAMP1 - coeficiente de amortecimento viscoso
na direção horizontal.

DAMP2 - Idem, vertical.

RHO - densidade do material.

ELAST - coeficiente de elasticidade.

POISS - coeficiente de Poisson.

XDEL - incremento horizontal.

YDEL - incremento vertical.

ALFA - coeficiente de expansão linear.

Cartão 5 (I3) - NREG (associado ao cartão 6)

NREG - Número código da zona de acordo com o
estabelecido no Apêndice B.

Cartão 6 (4(4I3,6x)) - (IR1(K),IR2(K),IC1(K),
IC2(K), K=1,4)

Especifica-se zonas retangulares constituídas de vários blocos consecutivos IR1 e IR2 fornecem os limites ao longo das linhas, IC1 e IC2 ao longo das colunas. Por exemplo a entrada IR1=5, IR2=6, IC1=1, IC2=3, indica que a zona NREG se estende da linha 5 a 6 e da coluna 1 a

APÊNDICE C (cont).

3. Os dados são lidos até uma entrada em branco, isto é, IR1=0.

Usa-se tantos cartões 5 e 6 quantos necessários. Um cartão 5 em branco indica fim da especificação das zonas.

C.2 - Unidades lógicas

Unidade lógica 9 - Arquivo das temperaturas segundo o o formato (((TEMP(I,J)),J=1,JM), I=1,IM)).

Unidade lógica 10 - Arquivo usado para quardar os valores finais de velocidades, deslocamentos, etc...

C.3 - Listagem

```
      DIMENSION U(101,42),DU(101,42),W(101,42),DW(101,42),A(101,42),
     2C(101,42),T(101,42),P(101,42),Q(101,42),KODE(101,42),LINE(121),
     3SYMBOL(36),NON(101,42),H(101,42),TEMP(101,42)
      DIMENSION IR1(4),IR2(4),IC1(4),IC2(4)
      COMMON/A1/ IM,JM
      REAL LINE
      DATA SYMBOL/1H ,1H.,1H*,1H1,1H2,1H3,30*0./
      ITER=0
      WRITE(6,2010)
 2010 FORMAT(1H1,30X,'***** ANALISE DE TENSOES TERMICAS *****')
      READ(5,11) IOP1,IOP2
      IF(IOP1.GT.0)WRITE(6,2020)
      IF(IOP2.GT.0)WRITE(6,2030)
 2020 FORMAT(///,1X,'***** VELOCIDADES,DESLOCAMENTOS E TENSOES SERAO GRA
     *VADOS NO ARQUIVO  10 APOS O JOB')
 2030 FORMAT(///,1X,'***** CONTINUACAO DE CASO ANTERIOR'/' ***** VALORES
     *INICIAIS SERAO LIDOS NO ARQUIVO 10')
C ***** NUMERO DE LINHAS E COLUNAS
      READ(5,11)IM,JM,IG1,JG1,IG2,JG2
      IM1=IM+1
      JM1=JM+1
   11 FORMAT(24I3)
C ***** CONSTANTES DE ENTRADA
      READ(5,13)LDEL,MEND
   13 FORMAT(18I4)
      READ(5,12)TDEL,DAMP1,DAMP2,RHO,ELAST,POISS,XDEL,YDEL,ALFA
   12 FORMAT(6E12.3/6E12.3)
      ITM=LDEL*MEND
      WRITE(6,2040)ITM,RHO,ELAST,POISS,ALFA
 2040 FORMAT(///'    CONSTANTES DE ENTRADA '//
     1'         NUMERO MAXIMO DE ITERACOES',8X,I5//
     2'                          DENSIDADE',3X,1PE10.3,' KG/M**3'//
     3'          CONSTANTE DE ELASTICIDADE',3X,1PE10.3,'  N/M**2'//
     4'             COEFICIENTE DE POISSON',3X,1PE10.3//
     5'            COEFICIENTE DE EXPANSAO',3X,1PE10.3,'   C**-1'//)
C ***** ZONEAMENTO
   27 READ(5,14)NREG
   14 FORMAT(I3)
      IF(NREG.EQ.0) GO TO 18
   19 READ(5,16)(IR1(K),IR2(K),IC1(K),IC2(K),K=1,4)
   16 FORMAT(4(4I3,6X))
      DO 15 K=1,4
   21 IF(IR1(K).EQ.0) GO TO 27
      IBEG=IR1(K)
      IEND=IR2(K)
      JBEG=IC1(K)
      JEND=IC2(K)
      IF((IBEG.GT.IM1).OR.(IBEG.GT.IEND))GO TO 1555
      IF((IEND.GT.IM1).OR.(JEND.GT.JM1))GO TO 1555
      IF((JBEG.GT.JM1).OR.(JBEG.GT.JEND))GO TO 1555
      DO 15 I=IBEG,IEND
      DO 15 J=JBEG,JEND
   15 KODE(I,J)=NREG
      GO TO 19
   18 CONTINUE
      H1=1./(1.+0.5*DAMP2)
      H2=1.-0.5*DAMP2
      G1=1./(1.+0.5*DAMP1)
```

```
      G2=1.-0.5*DAMP1
      G3=TDEL/RHO
      G4=(ELAST*TDEL)/(1.-POISS**2)
      G5=(ELAST*TDEL)/(2*(1.+POISS))
      DO 1 I=1,IM1
      DO 1 J=1,JM1
      U(I,J)=0
      DU(I,J)=0
      W(I,J)=0
      DW(I,J)=0
      A(I,J)=0
      C(I,J)=0
      T(I,J)=0
      P(I,J)=0
      Q(I,J)=0
      NON(I,J)=0
    1 TEMP(I,J)=0.
      IF(IOP2.EQ.0) GO TO 3
      READ(10)(((U(I,J),DU(I,J),W(I,J),DW(I,J),A(I,J),C(I,J),T(I,J),
     1P(I,J),Q(I,J),NON(I,J)),J=1,JM1),I=1,IM1)
      READ(10)ITER
      REWIND 10
      WRITE(6,2090)
 2090 FORMAT(///' ***** VELOCIDADES,DESLOCAMENTOS E TENSOES LIDOS NO ARQ
     *UIVO 10 ')
    3 READ(9)(((TEMP(I,J),SHU),J=1,JM),I=1,IM)
      DO 5 I=1,IM1
    5 TEMP(I,JM1)=TEMP(I,JM)
      DO 6 J=1,JM1
    6 TEMP(IM1,J)=TEMP(IM,J)
      DO 2233 I=1,IM1
      DO 2233 J=1,JM1
 2233 TEMP(I,J)=TEMP(I,J)+700.
       KEY=0
      DO 620 I=1,IM
      DO 620 J=1,JM
      IF(P(I,J).NE.0.)KEY=1
      IF(Q(I,J).NE.0.)KEY=1
  620 CONTINUE
      IF(KEY.EQ.0)GO TO 627
      CALL MATPRT(P,1,1)
      CALL MATPRT(Q,1,2)
  627 WRITE(6,625)
  625 FORMAT(1H1,'   ZONEAMENTO')
      WRITE(6,622)(I,I=1,JM1)
  622 FORMAT( / ,6X,42I3/)
      DO 623 I=1,IM1
  623 WRITE(6,624)I,(KODE(I,J),J=1,JM1)
  624 FORMAT(1X,I3,2X,42I3)
      WRITE(6,622)(I,I=1,JM1)
      WRITE(6,2050)XDEL,YDEL
 2050 FORMAT(//,5X,'INCREMENTO X    ',1PE10.3,' M'//,5X,'INCREMENTO Y    '
     *,1PE10.3,' M')
      WRITE(6,2060)TDEL,DAMP1,DAMP2
 2060 FORMAT(1H1,5X,
     1'           INCREMENTO DE TEMPO     ',1PE10.3,' SEG'//,6X,
     2' COEF. AMORTECIMENTO VISCOSO X     ',1PE10.3//,6X,
     3' COEF. AMORTECIMENTO VISCOSO Y     ',1PE10.3///)
```

```
      WRITE(6,2070)
 2070 FORMAT(1H ,'VELOCIDADE VS. TEMPO - V1 E V2 EM MM/SEG'/)
      WRITE(6,1401)
 1401 FORMAT (1H0,'-6',8X,'-5',8X,'-4',8X,'-3',8X,'-2',8X,'-1',8X,'0',
     *9X,'1',9X,'2',9X,'3',9X,'4',9X,'5',9X,'6')
      DO 1310 J=1,121
 1310 LINE(J)=SYMBOL (2)
      DO 1320 J=1,121,10
 1320 LINE(J)=SYMBOL(3)
      WRITE(6,1402)LINE
 1402 FORMAT (1H,121A1)
      NN=1
      IF(IOP2.NE.0)GO TO 1410
      DO 1947 I=1,IM1
      DO 1947 J=1,JM1
      A(I,J)=(TEMP(I,J)*ALFA*ELAST)/(1.-POISS)
      IF(KODE(I,J).EQ.7)A(I,J)=0.
      IF(KODE(I,J).EQ.3)A(I,J)=0.
      IF(KODE(I,J).EQ.4)A(I,J)=0.
      IF(KODE(I,J).EQ.43)A(I,J)=0.
      IF(KODE(I,J).EQ.44)A(I,J)=0.
      IF(KODE(I,J).EQ.45)A(I,J)=0.
      IF(KODE(I,J).EQ.46)A(I,J)=0.
      IF(KODE(I,J).EQ.47)A(I,J)=0.
 1947 C(I,J)=A(I,J)
 1410 DO 1200 M=1,MEND
      DO 1199 L=1,LDEL
      N=(M-1)*LDEL+L
      DO 1150 I=1,IM1
      DO 1150 J=1,JM1
      K=KODE(I,J)
      GO TO (101,101,103,1150,105,105,1150,101,109,110,
     1101,112,113,101,101,116,117,101,112,101,
     2101,101,101,101,113,112,127,128,101,127,
     3131,101,101,127,113,136,137,113,139,140,
     4139,139,143,1150,1150,146,146),K
  101 U(I,J)=G1*G2*U(I,J)+G1*G3*((A(I,J-1)+P(I,J)-A(I,J))/XDEL+(T(I,J)-
     *T(I+1,J))/YDEL)
      GO TO 1150
  103 U(I,J)=G1*G2*U(I,J)+2*G1*G3*((A(I,J-1)+P(I,J))/XDEL+(T(I,J-1)-
     *T(I+1,J-1))/(4*YDEL))
      GO TO 1150
  105 U(I,J)=G1*G2*U(I,J)+2*G1*G3*((P(I,J)-A(I,J))/XDEL+(T(I,J+1)-
     *T(I+1,J+1))/(4*YDEL))
      GO TO 1150
  109 U(I,J)=G1*G2*U(I,J)+2*G1*G3*((P(I,J)-A(I,J))/XDEL+
     *(2*T(I,J)-T(I+1,J+1))/(4*YDEL))
      GO TO 1150
  110 U(I,J)=G1*G2*U(I,J)+2*G1*G3*((P(I,J)-A(I,J))/XDEL+
     *(T(I,J+1)-T(I+1,J+1))/(4*YDEL))
      GO TO 1150
  112 U(I,J)=G1*G2*U(I,J)+2*G1*G3*((P(I,J)-A(I,J))/XDEL-
     1T(I+1,J+1)/(4*YDEL))
      GO TO 1150
  113 U(I,J)=G1*G2*U(I,J)+G1*G3*((A(I,J-1)+P(I,J)-A(I,J))/XDEL+
     1(2*T(I,J)-T(I+1,J))/(2*YDEL))
      GO TO 1150
  116 U(I,J)=G1*G2*U(I,J)+G1*G3*(P(I,J)+A(I,J-1)-A(I,J))/XDEL+
```

```
   1(2*(T(I,J)-T(I+1,J)))/(2*YD L))
     GO TO 1150
 117 U(I,J)=G1*G2*U(I,J)+2*G1*G3*((-P(I,J)-A(I,J))/XDEL+
    1(2*T(I,J)-T(I+1,J+1))/(4*YD L))
     GO TO 1150
 127 U(I,J)=G1*G2*U(I,J)+G1*G3*( P(I,J)+A(I,J-1)-A(I,J))/XDEL+
    1(T(I,J)-2*T(I+1,J))/(2*YDEL )
     GO TO 1150
 128 U(I,J)=G1*G2*U(I,J)+2*G1*G3*((-P(I,J)-A(I,J))/XDEL+
    1(T(I,J)-T(I+1,J))/(2*YDEL))
     GO TO 1150
 131 U(I,J)=G1*G2*U(I,J)+2*G1*G3*((P(I,J)-A(I,J))/XDEL+
    1T(I,J)/(2*YDEL))
     GO TO 1150
 136 U(I,J)=G1*G2*U(I,J)+2*G1*G3*((P(I,J)-A(I,J))/XDEL+
    1(T(I,J+1)-2*T(I+1,J))/(4*YD L))
     GO TO 1150
 137 U(I,J)=G1*G2*U(I,J)+2*G1*G3*((P(I,J)-A(I,J)-A(I,J))/XDEL+
    1T(I,J+1)/(4*YDEL))
     GO TO 1150
 139 U(I,J)=G1*G2*U(I,J)+2*G1*G3 ((P(I,J)-A(I,J))/XDEL-
    1T(I+1,J)/(2*YDEL))
     GO TO 1150
 140 U(I,J)=G1*G2*U(I,J)+2*G1*G3 ((P(I,J)-A(I,J))/XDEL+
    1T(I,J)/(2*YDEL))
     GO TO 1150
 143 U(I,J)=G1*G2*U(I,J)+2*G1*G3*((A(I,J-1)+P(I,J))/XDEL+
    2(2*T(I,J)-T(I+1,J-1))/(4*YDEL))
     GO TO 1150
 146 U(I,J)=G1*G2*U(I,J)+2*G1*G3*((A(I,J-1)+P(I,J))/XDEL+
    2(2*T(I,J))/(4*YDEL))
1150 CONTINUE
     DO 151 I=1,IM1
     DO 151 J=1,JM1
     DU(I,J)=DU(I,J)+U(I,J)*TDEL 1000
 151 CONTINUE
     DO 1160 I=1,IM1
     DO 1160 J=1,JM1
     K=KODE(I,J)
     GO TO (201,202,1160,204,201 202,1160,201,201,201,
    1211,212,201,201,215,201,217 201,219,201,
    2221,222,223,224,201,226,227 201,211,230,
    3201,201,222,234,201,201,201 211,212,217,
    4219,226,243,244,245,243,247 ,K
 201 W(I,J)=H1*H2*W(I,J)+H1*G3*( C(I-1,J)+Q(I,J)-C(I,J))/YDEL+(T(I,J)-
    *T(I,J+1))/XDEL)
     GO TO 1160
 202 W(I,J)=H1*H2*W(I,J)+H1*2*G3 ((+Q(I,J)-C(I,J))/YDEL+
    *(T(I+1,J)-T(I+1,J+1))/(4*XD L))
     GO TO 1160
 204 W(I,J)=H1*H2*W(I,J)+2*H1*G3 ((C(I-1,J)+Q(I,J))/YDEL+(T(I-1,J)-
    *T(I-1,J+1))/(4*XDEL))
     GO TO 1160
 211 W(I,J)=H1*H2*W(I,J)+H1*G3*( Q(I,J)+C(I-1,J)-C(I,J))/YDEL+
    1(T(I,J)-0.5*T(I,J+1))/XDEL)
     GO TO 1160
 212 W(I,J)=H1*H2*W(I,J)+2*H1*G3*((Q(I,J)-C(I,J))/YDEL-
    1T(I,J+1)/(2*XDEL))
```

```
      GO TO 1160
  215 W(I,J)=H1*H2*W(I,J)+2*H1*G3*((Q(I,J)-C(I,J))/YDEL+
     1T(I,J)/(2*XDEL))
      GO TO 1160
  217 W(I,J)=H1*H2*W(I,J)+H1*G3*((Q(I,J)+C(I-1,J)-C(I,J))/YDEL+
     1(T(I,J)-2*T(I,J+1))/(2*XDEL))
      GO TO 1160
  219 W(I,J)=H1*H2*W(I,J)+2*H1*G3*((Q(I,J)-C(I,J))/YDEL-
     1T(I+1,J+1)/(4*XDEL))
      GO TO 1160
  221 W(I,J)=H1*H2*W(I,J)+2.*H1*G3*((Q(I,J)-C(I,J))/YDEL+
     1(T(I+1,J)-T(I+1,J+1))/(4*XDEL))
      GO TO 1160
  222 W(I,J)=H1*H2*W(I,J)+2*H1*G3*((Q(I,J)-C(I,J))/YDEL+
     1(T(I+1,J)-2*T(I,J+1))/(4*XDEL))
      GO TO 1160
  223 W(I,J)=H1*H2*W(I,J)+2*H1*G3*((Q(I,J)-C(I,J))/YDEL+
     1T(I+1,J)/(4*XDEL))
      GO TO 1160
  224 W(I,J)=H1*H2*W(I,J)+2*H1*G3*((Q(I,J)-C(I,J))/YDEL+
     1(2*T(I,J)-T(I+1,J+1))/(4*XDEL))
      GO TO 1160
  226 W(I,J)=H1*H2*W(I,J)+2*H1*G3*((Q(I,J)-C(I,J))/YDEL-
     1T(I,J+1)/(2*XDEL))
      GO TO 1160
  227 W(I,J)=H1*H2*W(I,J)+H1*G3*((Q(I,J)+C(I-1,J)-C(I,J))/YDEL+
     1(T(I,J)-2*T(I,J+1))/(2*XDEL))
      GO TO 1160
  230 W(I,J)=H1*H2*W(I,J)+2*H1*G3*((Q(I,J)-C(I,J))/YDEL+
     1T(I,J)/(2*XDEL))
      GO TO 1160
  234 W(I,J)=H1*H2*W(I,J)+2*H1*G3*((Q(I,J)-C(I,J))/YDEL+
     1(2*T(I,J)-T(I+1,J+1))/(4*XDEL))
      GO TO 1160
  243 W(I,J)=H1*H2*W(I,J)+2*H1*G3*((Q(I,J)+C(I-1,J))/YDEL+
     2 (2*T(I,J))/(4*XDEL))
      GO TO 1160
  244 W(I,J)=H1*H2*W(I,J)+2*H1*G3*((C(I-1,J)+Q(I,J))/YDEL-
     2(T(I,J+1))/(4*XDEL))
      GO TO 1160
  245 W(I,J)=H1*H2*W(I,J)+2*H1*G3*((T(I-1,J)-2*T(I,J+1))/(4*XDEL))
      GO TO 1160
  247 W(I,J)=H1*H2*W(I,J)+2*H1*G3*((C(I-1,J)+Q(I,J))/YDEL+
     2(2*T(I,J)-T(I-1,J+1))/(4*XDEL))
 1160 CONTINUE
      DO 161 I=1,IM1
      DO 161 J=1,JM1
      DW(I,J)=DW(I,J)+W(I,J)*TDEL*1000
  161 CONTINUE
      DO 1170 I=1,IM1
      DO 1170 J=1,JM1
      K=KODE(I,J)
      GO TO (301,301,1170,1170,301,301,1170,308,301,301,
     1308,301,313,301,308,301,301,313,301,313,
     2301,301,308,301,325,301,301,301,301,308,
     3313,325,301,301,325,301,313,325,301,313,
     4301,301,1170,1170,1170,1170,1170),K
  301 A(I,J)=A(I,J)+G4*((U(I,J)-U(I,J+1))/XDEL+POISS*(W(I,J)-W(I+1,J))/
```

```
     *YDEL)
      GO TO 168
  308 A(I,J)=A(I,J)+G4*((U(I,J)-U(I,J+1))/XDEL+
     *POISS*(W(I,J)-W(I+1,J)))/YDEL)
      GO TO 168
  313 A(I,J)=A(I,J)+G4*((U(I,J)-U(I,J+1))/XDEL+
     1POISS*(W(I,J)-W(I+1,J)))/YDEL)
      GO TO 168
  325 A(I,J)=A(I,J)+G4*((U(I,J)-U(I,J+1))/XDEL+
     1POISS*(W(I,J)-W(I+1,J)))/YDEL)
  168 IF(ABS(A(I,J)).GT.1.E+12)GO TO 171
 1170 CONTINUE
      DO 1180 I=1,IM1
      DO 1180 J=1,JM1
      K=KODE(I,J)
      GO TO (401,401,1180,1180,401,401,1180,408,401,401,
     1408,401,413,401,408,401,401,413,401,413,
     2401,401,408,401,425,401,401,401,401,408,
     3413,425,401,401,425,401,413,425,401,413,
     4401,401,1180,1180,1180,1180,1180),K
  401 C(I,J)=C(I,J)+G4*((W(I,J)-W(I+1,J))/YDEL+POISS*(U(I,J)-U(I,J+1))/
     *XDEL)
      GO TO 169
  408 C(I,J)=C(I,J)+G4*((W(I,J)-W(I+1,J))/YDEL+
     *POISS*(U(I,J)-U(I,J+1))/XDEL)
      GO TO 169
  413 C(I,J)=C(I,J)+G4*((W(I,J)-W(I+1,J))/YDEL+
     1POISS*(U(I,J)-U(I,J+1))/XDEL)
      GO TO 169
  425 C(I,J)=C(I,J)+G4*((W(I,J)-W(I+1,J))/YDEL+
     1POISS*(U(I,J)-U(I,J+1))/XDEL)
  169 IF(ABS(C(I,J)).LT.1.E+20)GO TO 1180
  171 WRITE (6,1201)N
      WRITE (6,172)I,J
  172 FORMAT(///,5X,21HTENSAO EXCESSIVA EM (,I2,1H,I2,1H))
      GO TO 1203
 1180 CONTINUE
      DO 1190 I=1,IM1
      DO 1190 J=1,JM1
      K=KODE (I,J)
      GO TO (501,1190,1190,1190,1190,1190,1190,501,509,1190,
     1501,512,501,514,515,501,517,501,512,501,
     2501,1190,1190,515,501,1190,527,509,501,530,
     3509,501,1190,530,501,1190,1190,501,512,517,
     41190,1190,517,1190,1190,543,543),K
  501 T(I,J)=T(I,J)+G5*((U(I-1,J)-U(I,J))/YDEL+(W(I,J-1)-W(I,J))/XDEL)
      GO TO 1190
  509 T(I,J)=T(I,J)+G5*((U(I-1,J)-0.5*(U(I,J)+U(I,J)))/YDEL+
     *(W(I,J-1)-W(I,J))/XDEL)
      GO TO 1190
  512 T(I,J)=T(I,J)+G5*0.33*((U(I-1,J)-U(I,J))/YDEL+
     1(W(I,J-1)-W(I,J))/XDEL)
      GO TO 1190
  514 T(I,J)=T(I,J)+G5*((U(I-1,J)-U(I,J))/YDEL+
     1(0.5*(W(I,J-1)+W(I,J+1))-W(I,J))/XDEL)
      GO TO 1190
  515 T(I,J)=T(I,J)+G5*((U(I-1,J)-U(I,J))/YDEL+
     1(W(I,J-1)-0.5*(W(I,J)+W(I,J)))/XDEL)
```

```
      GO TO 1190
  517 T(I,J)=T(I,J)+G5*((U(I-1,J)-U(I,J))/YDEL+
     1(W(I,J-1)-W(I,J))/XDEL)*0.33
      GO TO 1190
  527 T(I,J)=T(I,J)+G5*((U(I-1,J)-U(I,J))/YDEL+
     1(W(I,J-1)-W(I,J))/XDEL)*0.33
      GO TO 1190
  530 T(I,J)=T(I,J)+G5*((U(I-1,J)-U(I,J))/YDEL+
     1(W(I,J-1)-W(I,J))/XDEL)*0.33
      GO TO 1190
  543 T(I,J)=T(I,J)+G5*0.33*((U(I-1,J)-U(I,J))/YDEL+(W(I,J-1)-
     2W(I,J))/XDEL)
 1190 CONTINUE
 1199 CONTINUE
      DO 1330 J=1,121
 1330 LINE(J)=SYMBOL(1)
      IF(NN-10)1334,1335,1335
 1334 LINE(61)=SYMBOL(2)
      GO TO 1336
 1335 LINE (61)=SYMBOL(3)
      NN=0
 1336 V1=1000.*U(IG1,JG1)
      J1=10.*(V1+6)+1.5
      IF (J1.LT.1.OR.J1.GT.120)       J1=60+J1/10
      IF (J1.LT.1.OR.J1.GT.120) GO TO 1337
      LINE (J1)=SYMBOL(4)
 1337 V2=1000.*W(IG2,JG2)
      J2=10.*(V2+6)+1.5
      IF (J2.LT.1.OR.J2.GT.120)J2=60+J2/10
      IF(J2.LT.1.OR.J2.GT.120)GO TO 1338
      LINE(J2)=SYMBOL(5)
 1338 WRITE(6,1408)LINE
 1408 FORMAT(1H ,121A1)
      NN=NN+1
 1200 CONTINUE
      WRITE(6,1201)N
      WRITE(6,1202)IG1,JG1,IG2,JG2
 1202 FORMAT(1H0,3X,'1=VELOCIDADE HORIZONTAL EM(',I2,',',I2,')',
     *6X,'2=VELOCIDADE VERTICAL EM(',I2,',',I2,')')
 1201 FORMAT(1H ,37X,'NUMERO DE ITERACOES = ',I4)
      ITER=ITER+N
      WRITE(6,2080)ITER
 2080 FORMAT(//,30X,'NUMERO TOTAL DE ITERACOES = ',I4)
      IF(IOP1.EQ.0)GO TO 1203
      WRITE(10)(((U(I,J),DU(I,J),W(I,J),DW(I,J),A(I,J),C(I,J),T(I,J),
     1P(I,J),Q(I,J),NON(I,J)),J=1,JM1),I=1,IM1)
      WRITE(10)ITER
      REWIND 10
      WRITE(6,1205)
 1205 FORMAT(//' ***** VELOCIDADES,DESLOCAMENTOS E TENSOES GRAVADOS NO
     1ARQUIVO 10'/'         PARA CONTINUACAO POSTERIOR '/)
 1203 CALL MATPRT(TEMP,1)
      DO 1210 I=1,IM1
      DO 1210 J=1,JM1
      U(I,J)=U(I,J)*1000.
 1210 W(I,J)=W(I,J)*1000.
      CALL MATPRT(U,2)
      CALL MATPRT(V,3)
```

```
      CALL MATPRT(DU,4)
      CALL MATPRT(DW,5)
      CALL MATPRT(A,6)
      CALL MATPRT(C,7)
      CALL MATPRT(T,8)
      DO 1500 I=1,IM
      DO 1500 J=1,JM
      Q(I,J)=0
      T(I,J)=0.25*(T(I,J)+T(I+1,J)+T(I,J+1)+T(I+1,J+1))
      Q(I,J)=0.5*(A(I,J)+C(I,J))-SQRT(0.25*(A(I,J)-C(I,J))**2+T(I,J)**2)
      P(I,J)=0.5*(A(I,J)+C(I,J))+SQRT(0.25*(A(I,J)-C(I,J))**2+T(I,J)**2)
      IF((A(I,J).EQ.0.).AND.(C(I,J).EQ.0.))GO TO 1501
      GO TO 1500
 1501 T(I,J)=0.
      Q(I,J)=0.
      P(I,J)=0.
 1500 CONTINUE
      CALL MATPRT(Q,9)
      CALL MATPRT(P,10)
      DO 1510 I=1,IM
      DO 1510 J=1,JM
 1510 T(I,J)=0.5*(P(I,J)-Q(I,J))
      CALL MATPRT(T,11)
      WRITE(6,1520)
 1520 FORMAT(///' ***** JOB TREMINADO NORMALMENTE ')
      STOP
 1555 WRITE(6,801)NREG,IBEG,IEND,JBEG,JEND
  801 FORMAT(1H1,' ***** ERRO NUMERO 1 '/'  ***** ZONEAMENTO FALHO'//,
     *10X,I3,3X,4I4)
      STOP
      END
```

```
      SUBROUTINE MATPRT(A,NOME)
      DIMENSION NN(60),A(101,42)
      COMMON/A1/ IM,JM
      N2=11
      N3=1
      N4=11
      GO TO (1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11),NOME
    1 WRITE(6,501)
      GO TO 600
  501 FORMAT(1H1,3X,'TEMPERATURAS, C'//)
    2 WRITE(6,502)
      GO TO 600
  502 FORMAT(1H1,3X,'VELOCIDADES HORIZONTAIS,MM/SEG'//)
    3 WRITE(6,503)
      GO TO 600
  503 FORMAT(1H1,3X,'VELOCIDADES VERTICAIS,MM/SEG'//)
    4 WRITE(6,504)
      GO TO 600
  504 FORMAT(1H1,3X,'DESLOCAMENTOS HORIZONTAIS,MM'//)
    5 WRITE(6,505)
      GO TO 600
  505 FORMAT(1H1,3X,'DESLOCAMENTOS VERTICAIS,MM'//)
    6 WRITE(6,506)
      GO TO 600
  506 FORMAT(1H1,3X,'TENSOES HORIZONTAIS,N/M**2'//)
    7 WRITE(6,507)
      GO TO 600
  507 FORMAT(1H1,3X,'TENSOES VERTICAIS,N/M**2'//)
    8 WRITE(6,508)
      GO TO 600
  508 FORMAT(1H1,3X,'TENSOES DE CISALHAMENTO,N/M**2'//)
    9 WRITE(6,509)
      GO TO 600
  509 FORMAT(1H1,3X,'TENSOES PRINCIPAIS MINIMAS,N/M**2'//)
   10 WRITE(6,510)
      GO TO 600
  510 FORMAT(1H1,3X,'TENSOES PRINCIPAIS MAXIMAS,N/M**2'//)
   11 WRITE(6,511)
  511 FORMAT(1H1,3X,'MAXIMAS TENSOES DE CISALHAMENTO, N/M**2'//)
  600 DO 601 I=1,JM
      NN(I)=I
  601 CONTINUE
   40 WRITE(6,4000)
      WRITE(6,3000)(NN(K),K=N3,N4)
      WRITE(6,4000)
      DO 602 I=1,IM
      WRITE(6,2000)I,(A(I,K),K=N3,N2)
  602 CONTINUE
      IF(N2-JM)60,70,70
   60 N2=N2+11
      IF(N2-JM)30,50,50
   50 N2=JM
      N3=N3+11
      N4=JM
      GO TO 40
   30 N3=N3+11
      N4=N4+11
      GO TO 40
```

```
2000 FORMAT(1H ,I3,2X,11(1PE10.3,1X))
3000 FORMAT(1H , 8X,11(I3,8X))
4000 FORMAT(/)
  70 RETURN
     END
```

APÊNDICE D - Referências Bibliográficas

1. BROGLI, R.H. & SCHULTIZ, K.R. Thorium utilization in an FBR/HTGR power system. In: AMERICAN power conference, Chicago, Illinois, April 29-May 1, 1974. San Diego, Calif., General Atomic Co., Power Systems Group, s.d.

2. CRANDALL, S.H. et alii. An introduction to the mechanics of solids. Tokyo, McGraw-Hill Kogakusha, 1972.

3. DAVIDSON, I. The analysis of cracked structures. São Paulo Instituto de Energia Atômica, 1974. (IEA-337).

4. EL-WAKIL, M.M. Nuclear heat transport. Toronto, International Textbook, 1971.

5. FAYA, A.J. et alii. The use of thorium-metal blankets in fast breeder reactors. Trans. Am. nucl. Soc., New York, 18:181-2, 1974.

6. FOWLER, T.B. et alii. Nuclear reactor core analysis code:CITATION. Oak Ridge, Oak Ridge National Lab. Jul. 1971. (ORNL-TM-2496, rev.2).

7. GCFR project staff: 300 MW(e) gas cooled fast breeder reactor demonstration plant: San Diego, Calif., General Atomic, Aug. 1974. (GA-A-13045).

8. GLASSTONE, S. et alii. Nuclear reactor engineering. Princeton N.J., Van Nostrand, 1967.

9. GUY, A.G. Elements of physical metallurgy. Reading, Mass., Addison-Wesley, 1959

APÊNDICE D (cont.)

10. HOLLAND, J.A. Dynamic relaxation applied to local effects. In: UDALL, M.S., ed. Proceedings of the prewstressed con - crete pressure vessel conference, London. London, Institution of Civil Engineers, 1968. p.587-95. (CONF-670301).

11. LAMARSH, J.R. Introduction to nuclear reactor theory. reading Mass., Addison-Wesley, 1966.

12. LANG, L.W. Power cost reduction by crossed-progeny fueling of thermal and fast reactors. Nucl. Appl., Hinsdale, Ill . 5:302-10, 1968.

13. LEGGETT, R.D. & KEMPER, R.S., eds. Status of thorium fuel technology. Richlard, Wash., Battelle-Northwest, Pacific Northwest Lab., Aug. 1968. (BNWL-861).

14. McCABE, L.W. & SMITH, J.C. Unit operations of chemical engineering. New York, McGraw-Hill, 1956.

15 MACIEL, A.C. & CRUZ, P.R. Perfil analítico do tório e terras raras. Rio de Janeiro, Departamento Nacional de Produção mineral, 1973. (DNPM, Bol.28).

16. MACIEL, & CRUZ, P.R. Perfil analítico do urânio. Rio de Janeiro, Departamento Nacional de Produção Mineral, 1973. (DNPM, Bol.27).

18. OOSTERKAMP, W.J. An evaluation of fast reactor blankets. In: KALLFELZ, J.M. & KARAM, R.A., eds. Advanced reactors: physics, design and economics. New York, Pergamon Press, 1975. p.721-30.

APÊNDICE D (cont.)

19. OTTER, J.R.H. et alii. Dynamic relaxation. Proc. Instn. Civ. Engrs, London, 35:633-56, 1966.

20. PETERSON, S. et alii. Properties of thorium, its alloys and its compounds. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Vienna. Utilization of thorium in power reactors: report of a panel held in Vienna, 14-18 June 1965. Vienna, 1966. p.292-312.

21. SEHGAL, B.R. Notes for the course "Introduction to fast breeder reactors" at Purdue University in Fall of 1973. S.n.t.

22. SMITH, C.O. Nuclear reactor materials. Reading, Mass., Addison-Wesley, 1967.

23. TIMOSHENKO, S.P. Resistência dos materiais. Rio de Janeiro, Ao Livro Técnico, 1967.

24. TIMOSHENKO, S.P. & GOODIER, J.N. Theory of elasticity. New York, McGraw-Hill, 1934.

25. TSEDERBERG, N.V. et alii. Thermodynamic and thermophysical properties of helium. Jerusalem, Israel Program for Scientific Translations, 1971.

26. USE of thorium in nuclear power reactors. Washington, D.C. AEC, Division of Reactor Development and Technology, Jun. 1969. (WASH-1097).

27. WILHELM, H.A. The metal thorium: proceedings of the conference

28. WOOD, P.J. & DRISCOLL, M.J. Assesment of thorium blankets for fast breeder reactors. Cambridge, Mass., Massachusetts Institute of Nuclear Engineering, Jul. 1973. (COO-2250-2; MITNE-148)

APÊNDICE D (cont.)

29. ZORZOLI, G.B. Use of metallic thorium for LWBRs and LWRs. Nucl. Technol., Hinsdale, Ill., 20:109-12, 1973.